

つくば技術開発センター1350mボーリングコアの地質学(2)
745.1m深度の砂質片麻岩中の微小断層群 — 脆性断層の微細機構 —

岡野 肇・妹尾洋一・三本健四郎・真鍋弘道・山根 誠・吉田 浩・原 郁夫

Geology of the 1350m Boring Cores from the OYO CORPORATION
TSUKUBA TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER (2)
Microfaults in Psammitic Gneiss from 745.1m depth
— Micromechanism of Brittle Faulting —

Hajime Okano, Youichi Seo, Kenshiro Mimoto, Hiromichi Manabe,
Makoto Yamane, Yutaka Yoshida and Ikuo Hara

Abstract

In psammitic gneiss core from 745.1m depth of the 1350m Boring drilled in the OYO CORPORATION TSUKUBA TECHNICAL RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER, Tsukuba, Japan are found microfaults as a conjugate system. It consists of quartz, plagioclase, K-feldspar and biotite, and is a fine-grained crystalline rock with a single set of weak gneissosity. The microfaults are recognized as calcite-filled veins (calcite veins), white flaky mineral-filled veins (white mineral veins) and plagioclase-filled veins (plagioclase veins), but most of them are calcite veins. Fault slip and slip sense along those veins are read from the orientation pattern of kink folds of biotite flakes just adjacent to them. Then, the acute bisectrix of the conjugate microfault sets corresponds to the acting direction of the compressive stress related to their formation, and the acute angle is ca.50° on average. Microtextures of the microfaults, as observed on their cross sections under the microscope, are described and discussed in this paper with special reference to understand micromechanism of brittle faulting.

During the formation of the calcite veins (white mineral veins and plagioclase veins) as microfaults, quartz, plagioclase and K-feldspar grains are deformed by the formation of cracks and their opening, while biotite flakes mainly by the formation of kink bands, by slip and opening along their band boundaries and by slip and opening along (001) planes. The formation of cracks and their opening along the grain boundaries of constituent minerals are also observed. Those types of microstructures are now recognized as relict microtextures such as healed cracks with minute mineral dusts and walls of calcite veins (white mineral veins and plagioclase veins).

The distribution of grains with healed cracks shows a clear tendency to be concentrated within narrow zones. Some of such zones are placed just around the calcite veins (white mineral veins and plagioclase veins), but others are not associated with them. Although in the latter case there is no vein as microfault, their trends are parallel to either one of the conjugate microfault sets. Slip along healed cracks, which is read from kink folds of biotite flakes, is commonly harmonic in sense with that along the adjacent microfaults (veins).

The orientation patterns and slip senses of calcite veins (white mineral veins and plagioclase veins) as microfaults and healed cracks in and around places, where the veins are only quite tiny, appear to indicate that both the former and the latter are classified into four types referred to the R1 type cracks, P type cracks, Y type cracks and T type cracks, respectively, commonly produced in shear experiments. The veins and healed cracks referred to the R1 type of cracks are pronounced. The appearance of the veins as microfaults (=formation of open cracks in which calcite, white flaky minerals and plagioclase crystallized) is not considered to have occurred until the phase when the Y type cracks are produced after the appearance

of R1 type cracks and P type cracks.

In and around places, where the thick calcite veins (white mineral veins and plagioclase veins) are produced as microfaults, the dominant healed cracks found in quartz grains show a clear tendency to be oriented parallel or subparallel to the general trends of the veins and are therefore considered to be referred to the Y type cracks, showing disappearance of the pre-existing cracks referred to the R1 type cracks and P type cracks. While the orientation patterns of cracks forming walls of the veins are classified into two types: the one is comparable with those found in and around places, where the veins are only quite tiny, and in the other the dominant cracks forming walls of the veins show a clear tendency to be oriented parallel or subparallel to their general trends. During the formation of the veins of the latter case, the selection of cracks forming the vein walls is considered to have occurred in such a fashion that the Y type cracks become dominant and the pre-existing R1 type cracks and P type cracks rather disappear. The formation of the thick veins and the disappearance of the pre-existing R1 type cracks and P type cracks may be related to the condition of strong fluid transport and high fluid pressure (probably for hydrofracturing) during the phase of the formation of the Y type cracks. In feldspar grains, however, are dominantly found the R1 type cracks. This is because their cracking is associated with alteration along crack walls forming white mineral films.

(要 旨)

つくば技術開発センターで掘削した1350mボーリングの745.1m深度で採集された砂質片麻岩中には、共役セットとして微小断層群が見いだされる。この砂質片麻岩は、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母からなり、ごく弱い片麻構造を示す細粒結晶質岩である。微小断層群は、方解石充填脈（方解石脈）、白色葉片状鉱物充填脈（白色鉱物脈）、斜長石充填脈（斜長石脈）として観察されるが、その主体は方解石脈である。これらの断層に沿った滑りとそのセンスは、それに接した黒雲母のキンク褶曲の配列パターンから読み取れる。この時、共役断層セットの鋭角2等分線が圧縮応力の作用方向となる。共役セットの鋭角は平均で約50°である。この報告では、脆性断層の微細機構の理解に向けて、この微小断層群のクロス・セクションの顕微鏡下で観察される微細組織が記載され考察される。

断層としての方解石脈（白色鉱物脈、斜長石脈）の形成において、石英、斜長石、カリ長石はクラックの形成とその開口として変形し、黒雲母は主としてキンク帯の形成、帯境界に沿う滑り、帯境界の開口、(001)面に沿った滑りと開口として変形している。また、これらの鉱物の粒界に沿ったクラックの形成とその開口も認められる。これらのクラックは、現在では、微細鉱物ダストの充填するヒールド・クラック、方解石脈（白色鉱物脈、斜長石脈）の壁として残存する。ヒールド・クラックをもつ粒の分布は、狭い帯に集中するような傾向を示す。このような帯には、断層としての方解石脈（白色鉱物脈、斜長石脈）を取り巻くものと、断層を伴わないものがある。後者は断層を伴わないけれども、そのトレンドは、共役断層セットのいずれかのトレンドに平行である。黒雲母のキンク褶曲からヒールド・クラックに沿った滑りが読み取れるところでは、その滑りセンスは周囲の断層に沿った滑りセンスと同じである。

断層としての方解石脈（白色鉱物脈、斜長石脈）の形成が微弱なところでは、方解石脈（白色鉱物脈、斜長石脈）、ヒールド・クラックは、配列パターンと滑りセンスから、剪断実験で一般に形成される滑り面R1クラック、滑り面Pクラック、滑り面Yクラック、引張割れ目Tクラックに対比される4つの型に識別される。滑り面R1クラックに対比される脈とヒールド・クラックの残存が顕著である。断層としての脈の出現（＝方解石、白色鉱物、斜長石が結晶した開口クラックの形成）は、滑り面R1相当クラックと滑り面P相当クラックが形成された後、Y相当クラックの形成時相になって起こったものと考えられる。

断層としての方解石脈（白色鉱物脈、斜長石脈）が、厚く平滑なところでは、脈の周辺の石英粒中に見られるヒールド・クラックは、一般に脈の平均的なトレンドに沿うもの（＝Y相当クラック）が卓越している。既存の滑り面R1相当クラックと滑り面P相当クラックは、消滅したのと考えられる。これに対して、脈の壁を構成するクラックには、方解石脈（白色鉱物脈、斜長石脈）の形成が貧弱なところで見られたのと同じような配列パターンを示すものと脈の平均的なトレンドに沿うもの（＝Y相当クラック）が卓越するものがある。後者では、断層としての方解石脈の形成において、クラックの選択は、滑り面Y相当クラックが卓越し、既存の滑り面R1相当クラックと滑り面P相当クラックがむしろ消滅するように起こったようである。これは、滑り面Y相当クラックの形成時相における、顕著な流体の移動と水圧破碎をもたらすほどの高い流体圧によるものであるのかもしれない。長石中にはR1相当クラックが卓越するが、これは長石の破碎がその壁に沿う変質によって、白色鉱物フィルムの形成を伴うからである。

キーワード：砂質片麻岩、脆性断層、クラック、微細機構

1. 緒言

つくば技術開発センターで掘削した1350mボーリング(図-1)の621.5m以深に分布する基盤岩類(領家変成岩類・花崗岩類)中には、基盤岩類が上昇し剝離され冷却する過程において、6つの時相に刻印された剪断帯(剪断帯-1~剪断帯-6)が発達する(三本ほか, 2000¹⁾)。三本ほかは、これら6つの時相の剪断帯の概略的特徴を記載し、それらが、ボーリングのどの深度に出現するかを柱状図として示した。この報告では745.1m深度で採集した砂質片麻岩(図-1)中の剪断帯-5時相の微小断層群を詳細に記載する。

三本ほか(2000)¹⁾が明らかにしたように、つくば1350mボーリングコアで記載した剪断帯-4の断層現象は、石英、長石、黒雲母の粒界滑りと黒雲母のキンク褶曲形成を主要機構とするものであり、剪断帯-5は石英と長石の破砕(Intercrystalline and intracrystalline fracturing)と黒雲母のキンク褶曲形成を主要機構とするものである。多くの実験的研究を基礎に一般に認められていることは、「Nucleation, growth, and interaction of microcracks are considered to be the dominant, controlling micromechanisms of macroscopic failure (Horie & Nemat-Nasser, 1985²⁾)」ということである。したがって、ここで記載する剪断帯-5の微小断層群は、複合微小断層(hybrid microfault)であるが、その微細組織もまた、脆性破壊が行われる場での断層の形成機構の理解にとって極めて重要な情報を提供するものと考えられる。しかし、Wong(1982, p.61)³⁾が述べたように、「An attempt to isolate one single dominating mechanism independent of mineralogy, pressure and temperature condition as responsible for brittle faulting in rock is probably not a useful approach」であろう。ここで記載する情報は、断層現象の理解にとって重要なものではあるが、これまで Bieniawski(1967)⁴⁾, Scholz(1968)⁵⁾, Friedman et al.(1970)⁶⁾, Haullbauer et al.(1973)⁷⁾, Peng & Johnson(1972)⁸⁾, Tapponier & Brace(1976)⁹⁾, Wong(1982)³⁾, Moore & Lockner(1995)¹⁰⁾, Menendez et al.(1996)¹¹⁾などによって提唱されてきた断層機構モデルの基礎となった実験情報とは明らかに異なっており、むしろSkempton(1966)¹²⁾, Tchalenko(1970)¹³⁾, Naylor et al.(1986)¹⁴⁾, Moore et al.(1986)¹⁵⁾などの剪断実験からの情報に近い特徴を示すものように見える。

745.1m深度で採集された砂質片麻岩中の剪断帯-5時相の微小断層群は、石英、長石にクラックの形成を伴う断層である。断層時に形成されたクラックは、現在では、ヒールド・クラック(healed crack)、方解石充填脈の壁、白色葉片状鉱物充填脈の壁、斜長石充填脈の壁として観察される。そして、断層群は、方解石充填脈、白色葉片状鉱物充填脈、斜長石充填脈として観察される。したがって、断層現象は、クラックの形成、クラックに

沿った滑りとともにクラックの開口、流体の通過と鉱物の析出を伴うように起こっており、複合断層と見なされるものである。しかし、この断層群の形成時に発生した破砕現象は、出現したクラックの総体ではなく、顕微鏡下で観察可能な程度に微細鉱物ダストが析出したヒールド・クラック、方解石が析出したクラック、白色葉片状鉱物が析出したクラック、斜長石が析出したクラックという限定された残存情報を基礎に描くことになる。このことは、発生したクラックの中でどのようなクラックが、顕微鏡下で観察可能な程度に残るのかを考察することの必要性を示唆するものでもある。

断層としての方解石充填脈、白色葉片状鉱物充填脈は、コア軸に垂直な断面で観察する時ほぼ平行な脈群として認められる。このため、この平行脈群に垂直でコア軸に平行な薄片においては、問題の断層のクロス・セクションが観察されるものと考えられる。この報告では、このような薄片において断層形成時の破砕現象の痕跡としての微細鉱物ダスト充填ヒールド・クラック、方解石充填脈、白色葉片状鉱物充填脈、斜長石充填脈の微細組織を観察した結果を詳細に記載し、脆性断層の微細機構を考察する。

一方では、この報告の目的が、長期にわたる保存が困

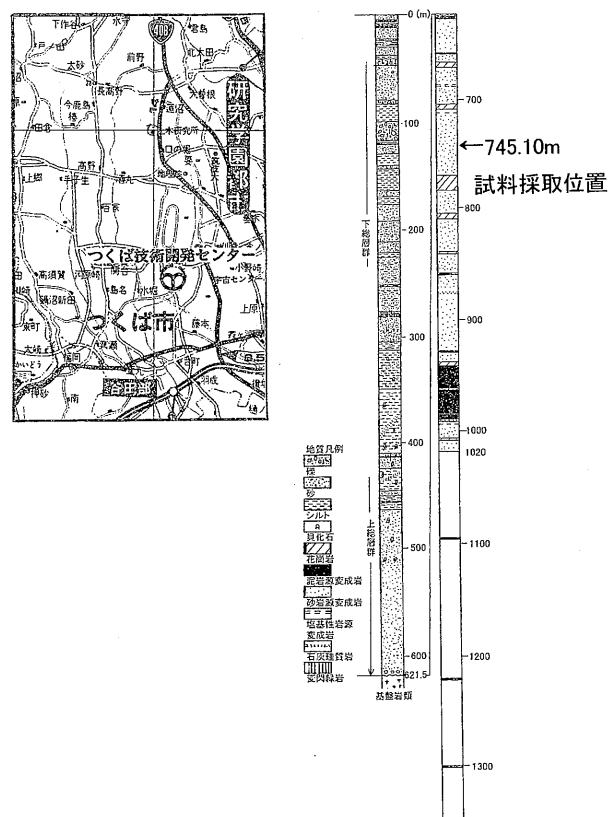


図-1 つくば1350mボアホールの位置とボーリングの地質柱状図。この報告で記載される試料の採取位置

Fig.1 Locality of the Tsukuba 1350m Borehole and geological columnar section of the boring, showing the locality of the specimen described in this paper.

難なボーリングコアで観察される重要な変形微細組織を顕微鏡写真として残し、将来の研究に寄与することにあることは言うまでもないことである。

2. 複合断層の微細組織

2.1 方解石充填脈と白色葉片状鉱物充填脈の断層としての認定

745.1m深度で採集された砂質片麻岩は、石英・斜長石・カリ長石・黒雲母・不透明鉱物を初生鉱物とする片麻岩である。片麻構造は微弱である(図版-1, 図版-2)。この岩石を横断して微小な方解石充填脈(方解石脈), 白色葉片状鉱物充填脈(白色鉱物脈), 斜長石充填脈(斜長石脈)が発達する。方解石脈が主体であり, 白色鉱物脈は極めて僅かである。斜長石脈は方解石脈の部分を構成するにすぎない。図版-1, 図版-2, 図版-3に見られるように, 方解石脈, 白色鉱物脈は, マクロ的には平滑に近い面構造である。図-2は, このような方解石脈, 白色鉱物脈の配列方位—各脈の平均的方位(Cvgt)—を, 2つの平行な薄片において測定した結果である。明瞭なバイモダル分布が認められる。最頻値のなす角は約 50° である。これらの脈は2つのセットとして発達するということができる。

このような方解石脈, 白色鉱物脈に接する黒雲母は,

キック褶曲(キック帯)を形成するようにして変形している(図版-4, 図版-5, 図版-6)。これらの脈から離れた位置では, 黒雲母にこのような変形構造は認められない。このため, 脈に接する位置での黒雲母のこのような変形は, 脈の形成と関連した現象であるということが出来る。黒雲母の褶曲の様式は, 脈に沿って引きずり(=剪断)があったことを示すものである。読み取れる剪断センスと脈の方位との関係は, 図-2のようになる: 同じセットに属する脈のほとんどは同じ剪断センスを示す関係にあり, 2つのセットは異なる剪断センスを示す脈で構成されている。検討した2枚の薄片において同じ関係が観察された(図-2)。剪断センスとの関係で見ると, 2つのセットを構成する脈は共役断層の関係にあり, 2つのセットの鋭角2等分線の方向が, 断層現象に関与した応力場での最大圧縮応力の作用方向であると見なされる関係にある。

方解石脈, 白色鉱物脈が黒雲母と衝突した時, 脈は, 黒雲母の(001)へき開面に沿って開口したり, (001)へき開面に垂直なクラックに沿って開口したり, 粒界に沿って開口したりして発達していることがある(図版-7)。このような位置では脈に沿った剪断センスは決定できない。このため, 方解石脈, 白色鉱物脈には, 剪断センスの決定出来ないものがある。しかし, このような脈の配列方位は, 剪断センスが決定出来た脈の配列方位とよく

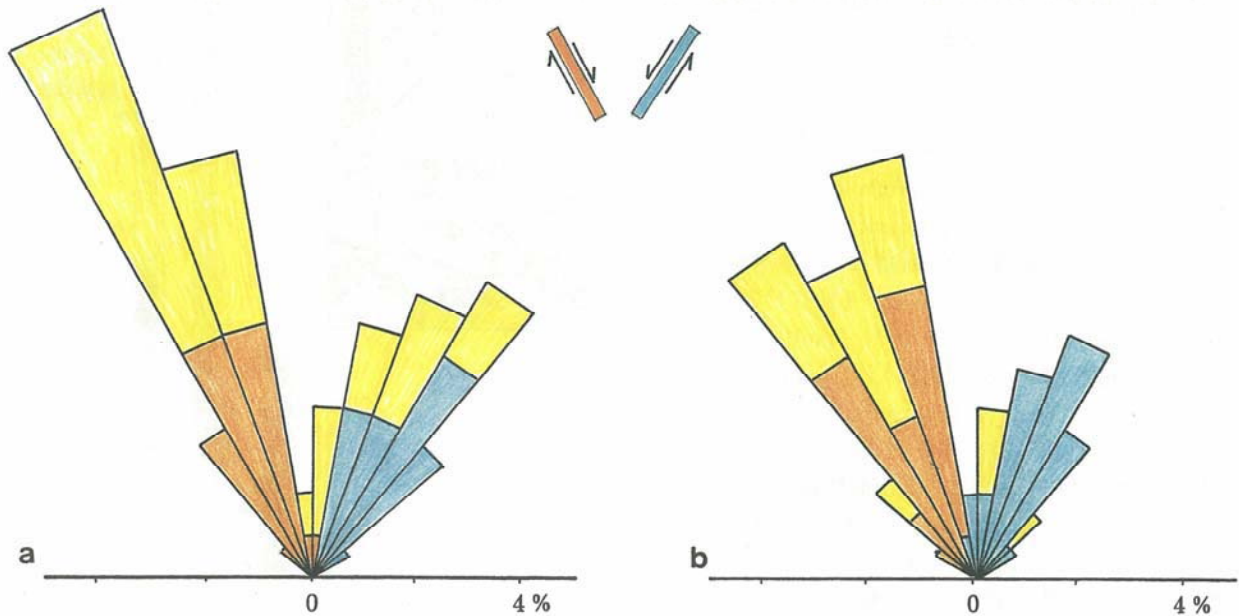


図-2 共役セットとしての方解石充填脈(方解石脈), 白色葉片状鉱物充填脈(白色鉱物脈)の配列方位を示すローズ図。2つのクロス・セクションにおいて顕微鏡下で測定した結果をそれぞれa図とb図に示した。オレンジ色: 右横ずれ剪断センスを示すセット, 青色: 左横ずれ剪断センスを示すセット, 黄色: 未定のセット(%表示)。

Fig.2 Rose diagrams illustrating the orientation direction of the calcite-filled veins (calcite veins) and white flaky mineral-filled veins (white mineral veins) developed in conjugate sets, as measured on two cross sections under the microscope. The diagrams a and b are respectively obtained from two different cross sections.

Orange: sets of right-lateral shear sense, blue: sets of left-lateral shear sense, yellow: non-decided sets (in %).

一致している(図-2)。剪断センスが決定できた脈においても、図版-7に示したような黒雲母組織はよく観察される(図版-8aとb)。断層に対する黒雲母の(001)へき開面の配置が、(001)へき開面の変形の様式(褶曲、開口)に関わっている。したがって、剪断センスの決定できない脈と剪断センスが決定できた脈とは、同一時相の構造であると考えられる。

2.2 断層に対するヒールド・クラック分布

この試料において、断層の発生から成長(=いわゆる through-going faultの形成)までの過程を理解するための情報を得るには、方解石脈、白色鉱物脈に対してヒールド・クラックは、どのような関係において分布するかを検討することがまず必要であろう。断層運動の先駆的現象として、岩石を構成する鉱物の破砕(=クラックの形成)があるという実験結果(e.g. Griggs & Handin, 1960¹⁶⁾; Brace, 1964¹⁷⁾; Mogi, 1966¹⁸⁾; Scholz,

1968¹⁹⁾; Friedman et al., 1970²⁰⁾; Haullbauer et al., 1973²¹⁾; Peng & Johson, 1972²²⁾; Tapponnier & Brace, 1976²³⁾; Wong, 1982²⁴⁾; Moore & Lockner, 1995²⁵⁾; Menendez et al., 1996²⁶⁾)はよく知られていることであるからである。では断層としての方解石脈、白色鉱物脈に対して、ヒールド・クラックは、どのような関係において分布するのであろうか。変形の歴史は長く、観察されるヒールド・クラックの形成が、断層としての方解石脈、白色鉱物脈の形成時相に限られるという保証は必ずしもあるわけではない。いくつかの変形時相の産物が含まれている可能性も考えられる。したがって、断層としての方解石脈、白色鉱物脈に対して、ヒールド・クラック分布がどのような関係であれば、両者は成因的に関連しあった構造であるといえるのかについて留意しながら情報の収集を行うことになる。

まず断層に対してヒールド・クラックを持つ粒の分布の仕方を解析した例を示そう。問題の検討には、断層と

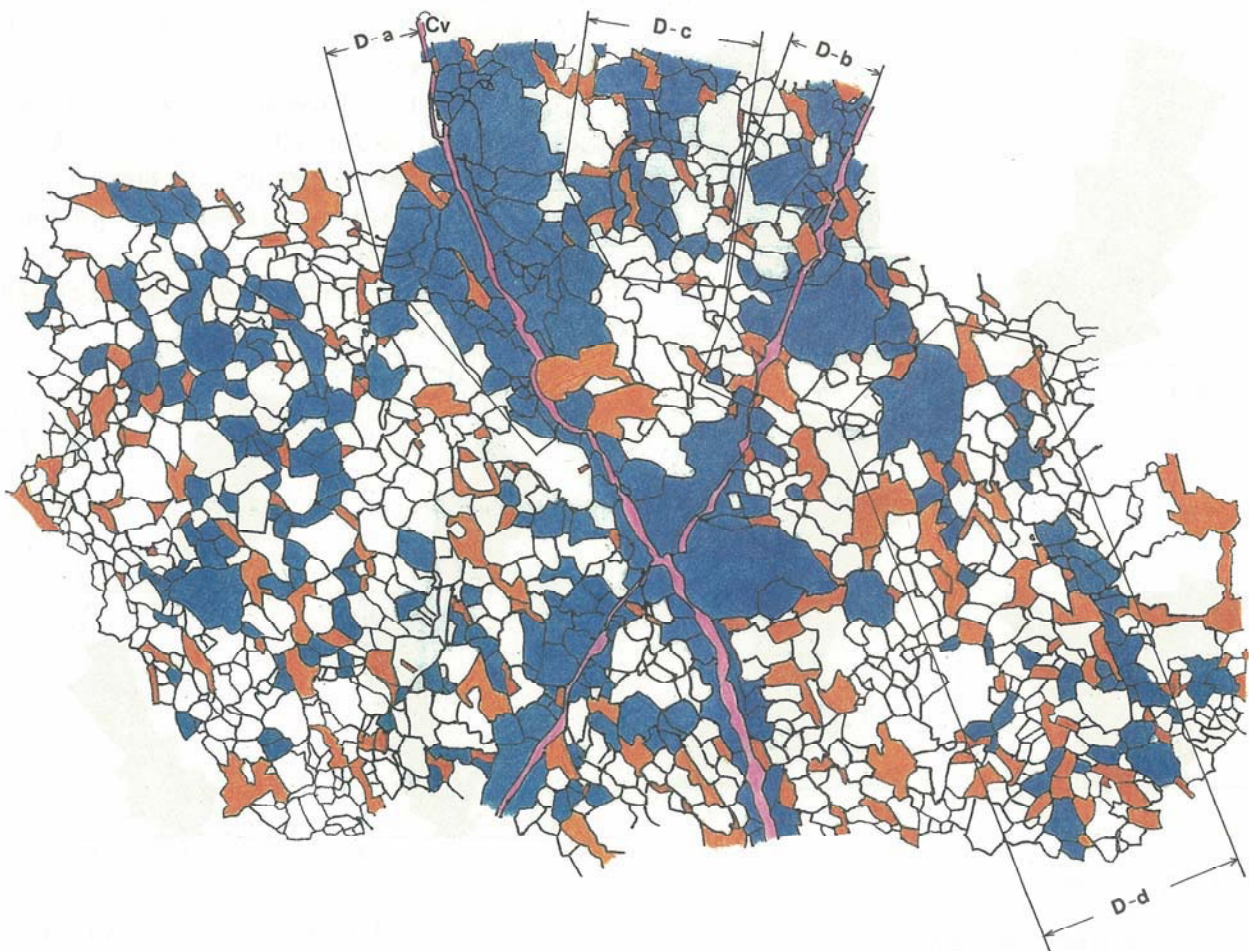


図-3 共役方解石脈(Cv)の周りにおけるヒールド・クラックをもつ鉱物粒の分布。この共役方解石脈は図版-2aに示されている。青色:ヒールド・クラックをもつ鉱物粒,白色:ヒールド・クラックが認められない鉱物粒,オレンジ色:黒雲母,ピンク色(Cv):方解石脈, D-a, D-b, D-c, D-d:ヒールド・クラックの配列方位を測定した領域(測定結果は図-4)。

Fig. 3 Distribution of mineral grains with healed cracks around the conjugate calcite veins (Cv), whose microphotograph is shown in Plate-2a. Blue: mineral grains with healed cracks, white: mineral grains without healed cracks, orange: biotite flakes, pink (Cv): calcite veins, D-a, D-b, D-c, D-d: domains in which the orientation directions of healed cracks have been measured (The results are shown in Fig.4).

しての方解石脈が出来る限り単純な形態——出来る限り平滑な面構造——を示す位置が選択されなければならない。このため、薄片内のかかなり広い範囲において1つの共役方解石脈のみが観察される位置で、方解石脈に対するヒールド・クラック分布を検討した。選択した位置の顕微鏡写真が図版-2aである。図-3が観察の結果である。図から、ヒールド・クラックを持つ石英粒と長石粒の分布は、分散を示すがランダムではないことが読み取れる：断層としての方解石脈の近傍の粒における発達頻度は極めて高い。断層から離れた位置では、ヒールド・クラックを持つ粒の多くは、散点的ではあるが、1つの帯を形成するように分布する。このような帯の配列方位は、いずれかのセットの断層のトレンドに平行である。このようなヒールド・クラックを持つ粒の分布様式は、ヒールド・クラックの形成が断層としての方解石脈の形成と関連する可能性の高さを示唆するものように見える。

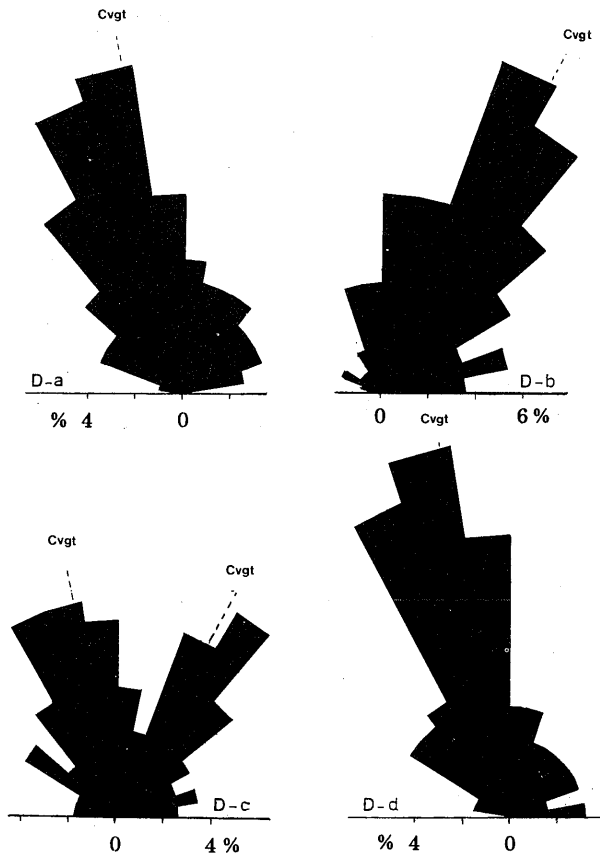


図-4 図-3の領域D-a, D-b, D-c, D-dにおけるヒールド・クラックの配列方位を示すローズ図。Cvgt: 測定領域に接する方解石脈のトレンド, 但しD-dのCvgtは測定領域のトレンド。

Fig.4 Rose diagrams illustrating the orientation direction of healed cracks in the domains, D-a, D-b; D-c, and D-d, of Fig.3. Cvgt: trend of calcite vein just adjacent to a measured domain, but the Cvgt in the D-d diagram is the trend of the D-d domain.

では、このような分布特性を示すヒールド・クラックの配列方位は、断層としての方解石脈のトレンドとは、どのような方位関係にあるのであろうか。また、ヒールド・クラックを持つ粒の分布帯——ここでは断層としての方解石脈、白色鉍物脈は発達しないが——のトレンドと帯内のヒールド・クラックの配列方位とは、どのような方位関係にあるのであろうか。図-4が測定の結果である。図から、断層近傍の粒に見られるヒールド・クラックの配列方位は、その断層のトレンドに沿うような方向で高い頻度分布を示す。断層は発達しないがヒールド・クラックを持つ粒が1つの帯状分布を示すところでは、ヒールド・クラックの配列方位は、その帯のトレンドに沿うような方向で高い頻度分布を示すということが指摘できる。

断層としての方解石脈近傍の粒に見られるヒールド・クラックの配列方位についてのいま1つの資料を図-5に示した。ここでもヒールド・クラックの配列方位は、その断層のトレンドに沿うような方向で高い頻度分布を示している。かくして、ヒールド・クラックの主体の形成が、断層としての方解石脈の形成と関連している可能性が極めて高いものように見える。

図版-9は、1つの共役断層系を形成する方解石脈を示すものである。縦方向の断層セットは、図の外側から図の両端までは連続する方解石脈として観察されるが、それから図の中央へ向かっては微細鉍物ダストの充填するヒールド・クラックとしてトレイスされる。このヒールド・クラックに沿った位置で石英の波動消光と細粒化

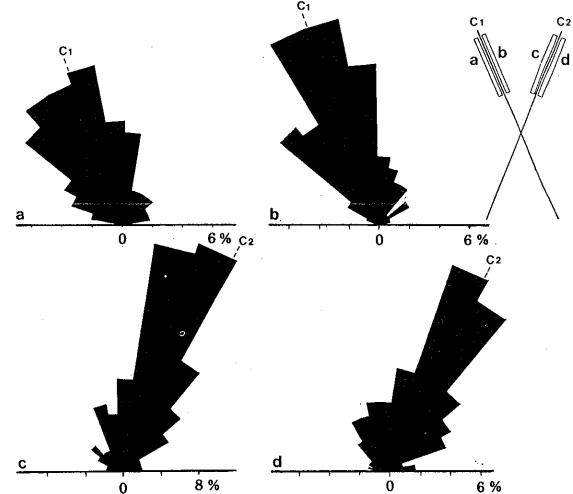


図-5 図版-3aの共役方解石脈(C1とC2)に接する狭い領域(a, b, c, d)におけるヒールド・クラックの配列方位を示すローズ図。ただし、図版-3aは方解石脈C1とC2の一部を示すにすぎない。

Fig.5 Rose diagrams illustrating the orientation direction of healed cracks in the narrow domains, a, b, c and d just adjacent to the conjugate calcite veins (C1 and C2) shown only partly in Plate-3a.

が認められる。しかし、図中の四角で囲んだ範囲では連続するヒールド・クラックも消滅している。この四角で囲んだ範囲内では、黒雲母が全体として顕著なキンク帯を形成しており(図版-9d)、このキンク帯から読み取れる剪断センスは、問題の断層セットの剪断センスと同じである。したがって、この断層セットでは、四角で囲んだ範囲内の断層に沿った剪断変形は、主として黒雲母におけるキンク帯の形成として行われたものと考えられる。図版-9cはまた、いま1つの断層セットの方解石脈が、黒雲母のキンク帯の帯境界に沿って形成されたことを示している。これらの事実、この位置では、方解石脈、ヒールド・クラック、黒雲母のキンク帯が同一時相に形成されたものであることを示唆している。

断層としての方解石脈、白色鉱物脈近傍において、脈に沿うように発達するヒールド・クラックが黒雲母片を通過するところでは、しばしば黒雲母片にキンク帯が形成されている(図版-10a, b, c)。これは、これらのヒールド・クラックが、モードIIの剪断クラックであることを示すものである。黒雲母のキンクから求められる剪断センスは、周りの断層のそれと調和的である。図版-10dは、方解石脈を構成する方解石に、断層過程に白色葉片状鉱物が充填した雁行状テンション・ギャッシュが形成されたことを示している。

以上の資料からすれば、方解石脈(白色鉱物脈)、ヒールド・クラック、黒雲母のキンク帯などの主体が、同じ応力場で互いに関連ある構造として形成されたもののように考えられる。この問題は更に後頁において検討する。

2.3 鉱物種とヒールド・クラックの発達様式

与えられた物理的条件(温度、圧力、歪み速度、水の量)の下での変形挙動は、鉱物種によって異なることはよく知られていることである(e.g. Passchier & Trouw, 1996¹⁹⁾参照)。このことは、ここで解析している試料においては、黒雲母がキンク帯を形成するように変形——黒雲母の(001)へき開面を横断するクラックは稀にのみ認められる(図版-7a, 図版-8c, d, 図版-9)——しているのに対して、石英と長石はクラックを形成するように変形していることとして認められている。脆性破壊が起こる条件下でクラックの発達様式は、石英、カリ長石、斜長石の間で異なる可能性がある(e.g. Wong, 1982²⁰⁾; Moore & Lockner, 1995¹⁰⁾; Menendez, et al., 1996¹¹⁾)。それは断層の形成過程に効果をもつ現象であろう。ここで解析している試料においては、ヒールド・クラックの発達様式は、石英、カリ長石、斜長石の間で異なるのであろうか。この点を検討しよう。断層としての方解石脈が出来るだけ平滑な面構造を形成している位置を選択して、方解石脈近傍の石英と長石——カリ長石と斜長石の識別が必ずしも十分ではないため、ここでは長石として一括する——に見られるヒールド・クラックの発達様式を比較検討する。

石英中のヒールド・クラックには、黒色の微細鉱物ダ

ストの充填として認められるものが多いが、長石中のそれには、白色葉片状鉱物の充填するフィルムとして認められるものが多い。このことは、長石におけるクラックの形成は、クラックの壁に沿った変質を伴うようにして起こった事を示すものである。

前頁において示した図版(顕微鏡写真)でも明らかのように、断層としての方解石脈の近傍においては、ヒールド・クラックに限らずクラックの発達是一般に極めて微弱である。ここでは2つの位置で行った方解石脈近傍の石英と長石に見られるヒールド・クラックの発達様式の比較検討の結果を示す(図-6, 図-7)。図版-11は図-6の解析位置の一部の顕微鏡写真である。図版-11においても、ヒールド・クラックに限らずクラックの発達が、極めて微弱であることが読み取れる。図-6と図-7は、断層としての方解石脈近傍においても、ヒールド・クラックを持たない石英粒と長石粒があることを示している。図-6はヒールド・クラックの発達様式を2つの方法で示したものである: 1) 配列方位の頻度分布, 2) ヒールド・クラックの長さの総和の方向による変化(長さの方向変化)。図-7は長さの方向変化を示したものである。2つの図から、石英と長石の間で、ヒールド・クラックの発達様式が、異なることが読み取れる。石英においては、分散はあるが、断層としての方解石脈のトレンド(Cvgt)に沿う方向のヒールド・クラックが著しく卓越する。これに対して、長石においては、図-6では、Cvgtの廻り約40°の範囲内にやや高い頻度分布が見られるものの、著しく分散が大きい。図-7ではCvgtに約15°斜交する方向に最頻値が位置している。長石には、1つの粒内に、2セットの高角度で斜交するヒールド・クラックがよく観察される(図-6, 図-7)。石英と長石の間でのヒールド・クラックの発達様式の相違は明瞭である。識別出来たカリ長石と斜長石と比較した限りでは、ヒールド・クラックの発達様式は、両者の間でほとんど異ならないように見える。

2.4 断層としての方解石脈の壁を構成するクラック

方解石脈が断層であることは、前頁で確認したことである。多くの方解石脈では、その壁——母晶の破碎によるクラック起源の構造——は高倍率の鏡下で一般に平滑ではなく、微小な面の階段状連結(stepwise joining)によるギザギザした構造として観察される。その包絡面は1つの平滑に近い面を形成する。これが断層としての方解石脈のトレンド(Cvgt)である。方解石脈の壁を構成するクラック——脈形成時の変質により、初生的構造に微小な変化があった可能性をもつ——は、石英粒、長石粒、黒雲母片を横断するクラック、それらの粒界に沿ったクラック、黒雲母の(001)面に沿ったクラック、(001)面に垂直なクラックの連結として発達している(図版-4, 図版-5, 図版-6, 図版-7, 図版-11, 図-6, 図-7)。ギザギザした構造がよく保持されていることは、このクラックの連結した面が、

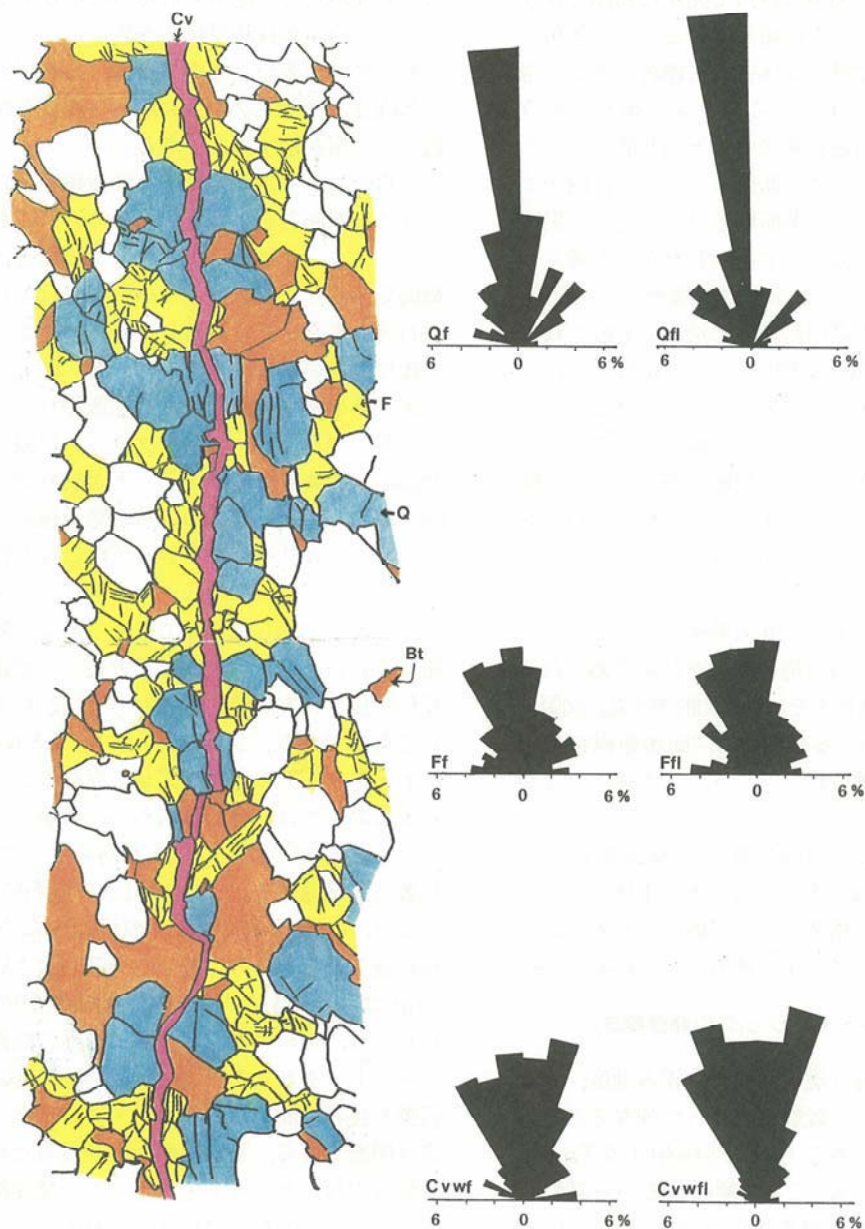


図-6 1つの厚い方解石脈(図版-11)に接する狭い領域で観察されるヒールド・クラックに関する資料。スケッチ(青色: ヒールド・クラックをもつ石英(Q), 黄色: ヒールド・クラックをもつ長石(F), ヒールド・クラック: 各粒内の黒い線, 白色: ヒールド・クラックをもたない粒, オレンジ色: 黒雲母(Bt), ピンク色: 方解石脈(Cv)}, Qf: 石英中のヒールド・クラックの配列方位のローズ図(%), Qfl: 石英中のヒールド・クラックの長さとの配列方位の関係を示すローズ図(%), Ff: 長石中のヒールド・クラックの配列方位のローズ図(%), Ffl: 長石中のヒールド・クラックの長さとの配列方位の関係を示すローズ図(%), Cvwf: 方解石脈の壁を構成するクラックの配列方位のローズ図(%), Cvwfl: 方解石脈の壁を構成するクラックの長さとの配列方位の関係を示すローズ図(%).

Fig. 6 Data for healed cracks found in narrow domains just adjacent to a thick calcite vein, whose microphotograph is shown in Plate-11. Sketch {blue: quartz grains (Q) with healed cracks (solid lines), yellow: feldspar grains (F) with healed cracks (solid lines), white: grains without healed cracks, orange: biotite flakes, pink: calcite vein (Cv)}, Qf: rose diagram illustrating the orientation direction of healed cracks in quartz grains(%), Qfl: rose diagram illustrating the relationship between the length and the orientation direction of healed cracks in quartz grains(%), Ff: rose diagram illustrating the orientation direction of healed cracks in feldspar grains(%), Ffl: rose diagram illustrating the relationship between the length and the orientation direction of healed cracks in feldspar grains(%), Cvwf: rose diagram illustrating the orientation direction of cracks forming the walls of calcite vein(%), Cvwfl: rose diagram illustrating the relationship between the length and the orientation direction of cracks forming the walls of calcite vein(%).

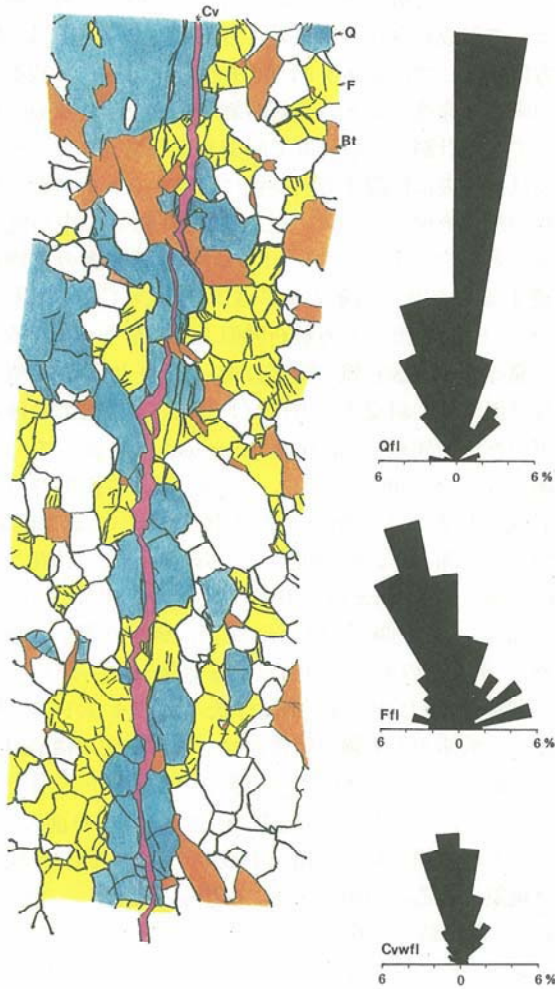


図-7 1つの厚い方解石脈に接する狭い領域で観察されるヒールド・クラックに関する資料。スケッチ {青色：ヒールド・クラック(黒い線)をもつ石英(Q)，黄色：ヒールド・クラック(黒い線)をもつ長石(F)，白色：ヒールド・クラックをもたない粒，オレンジ色：黒雲母(Bt)，ピンク色：方解石脈(Cv)}，Qfl：石英中のヒールド・クラックの長さとの配列方位の関係を示すローズ図(%)，Ffl：長石中のヒールド・クラックの長さとの配列方位の関係を示すローズ図(%)，Cvwfl：方解石脈の壁を構成するクラックの長さとの配列方位の関係を示すローズ図(%).

Fig. 7 Data for healed cracks found in narrow domains just adjacent to a thick calcite vein. Sketch {blue: quartz grains (Q) with healed cracks (solid lines), yellow: feldspar grains (F) with healed cracks (solid lines), white: grains without healed cracks, orange: biotite flakes, pink: calcite vein (Cv)}, Qfl: rose diagram illustrating the relationship between the length and the orientation direction of healed cracks in quartz grains (%), Ffl: rose diagram illustrating the relationship between the length and the orientation direction of healed cracks in feldspar grains (%), Cvwfl: rose diagram illustrating the relationship between the length and the orientation direction of cracks forming the walls of calcite vein (%).

断層であるとしても、この面に沿った変位量は極めて僅かであったことを示すものであろう。方解石脈中に破碎鉱物片が観察される例(図版-3b)は極めて稀で、3例にすぎない。

図-6、図-7、図-8には、方解石脈のトレンドが平滑な面構造を形成していると思われる位置での、方解石脈の壁を構成するクラックの配列方位と長さの方位変化に関する資料が6つ示してある。まず図-6、図-8dの位置での特徴を見てみよう。配列方位の図からは、壁がギザギザした構造を示すことを反映した、方位の分散がよく読み取れる。長さの方位変化の図(図-6)からは、方解石脈のトレンドと平行なものだけが卓越するのではなく、それに15°程度斜交する2つの方向にも卓越性が認められる。図-8dは配列方位の図であるが、図-6とほぼ同じ分布特性を示している。

これに対して、図-7、図-8a, b, cの4つの例では、主要な壁を構成するクラックの方位変化は小さい。壁の多くが30°以内の分散を示すクラックで占められている。

方解石脈の壁を構成するクラックの上記のような特徴は、図-6、図-7から読み取れるように、石英、長石中のヒールド・クラック分布と、直接的対応関係にないことは明らかである。方解石脈の壁は、変位量は僅かであるとしても、断層として発生-成長し、方解石脈の形成をもたらすように連結しながら開口したクラックの特徴を示すものである。即ち、形成されていたあるいは形成されるクラックの中から選択され、断層面の形成とその開口に参加したクラックの階段状連結のパターンの特徴を説明するものである。しかし、上記の資料は、断層過程に厚い連続性のよい1つの方解石脈が形成される場合において、開口に参加したクラックの階段状連結のパターンの特徴を説明するものである——このような方解石脈をもたらす場合に限定される——という限界を有するものと考える必要があろう。

2.5 どのようなクラックが形成され断層の発生-成長に繋がったか

では、どのようなクラックが形成され、それが断層の発生-成長に繋がったのであろうか。ここでの課題に答えるためには、できる限り方解石脈形成の初期段階に相当する組織を探し出すことが必要であろう。前節で記載した図-3、図-6(図版-11)、図-7の例のように厚い方解石脈が長く連結しているものよりは、1つの細い平滑な帯の中に分布するが連結が進んでいない細い貧弱な方解石脈の方が、より変形の初期段階を残すものである可能性があるかもしれない。滑りを伴う開口であれば、滑りやすくするため、できる限り平滑となるよう既存のクラックの結合が起こるはずである。このため、長く連結している厚い方解石脈の壁が、断層発生直前に岩石中に発達していたクラックの全体像を充分示すとは限らないであろう。また、長く連結している厚い方解石脈

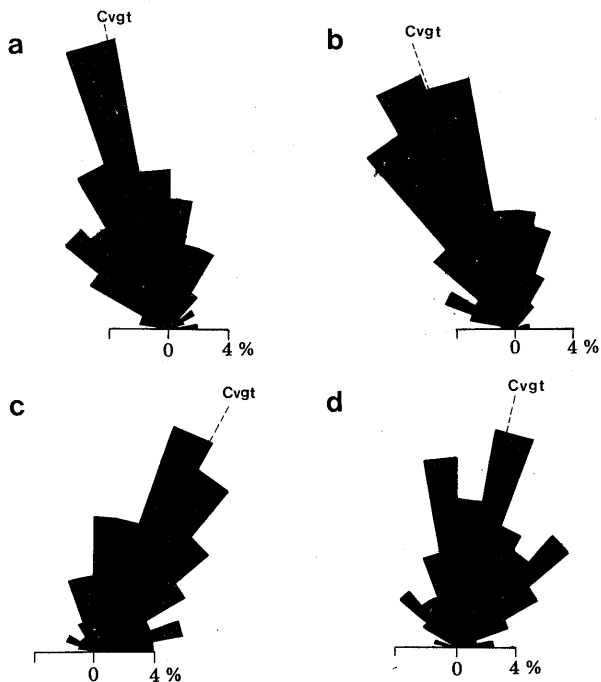


図-8 4つの厚い方解石脈の壁を構成するクラックの配列方位を示すローズ図(%)。Cvgt: 方解石脈のトレンド。
Fig.8 Rose diagrams illustrating the orientation direction of cracks forming the walls of four thick calcite veins (%). Cvgt: trend of calcite vein.

が形成されるような場合は、方解石脈形成時に、流体の移動がより顕著なところ、また水圧破砕(hydrofracturing)をもたらすほどに流体圧の高いところであった可能性がある。顕著な流体の移動は、このような方解石脈の近傍における既存のクラックを消滅させるように働いた可能性もあるかもしれない。このことは、1つの細い帯内に分布する連続性の乏しい薄い方解石脈およびその近傍に発達するヒールド・クラックの組織との比較によって明らかにされる可能性が考えられる。それは、断層発生時に岩石中に発達していたクラックの基本特性の理解とともに、顕著な方解石脈(=顕著な断層)の形成に関わる現象——どのようなクラックが連結(=断層の形成)し、どのようなクラックが残存(=ヒールド・クラック)し、どのようなクラックが消滅したか——についての理解に繋がるものである可能性が考えられる。そこで、ここでは、1つの細い帯の中に分布する連続性に乏しい貧弱な方解石脈の組織とその近傍に発達するヒールド・クラックの組織を検討する。

まず、図版-12の例を検討する。図において、連続性の乏しい方解石脈(脈の一部は白色葉片状鉱物が充填)は、1つの細い平滑な帯内(図のCvgt方向=帯のトレンド)に分布する。この帯を斜めに横断して1つの粗粒の黒雲母片があるが、この黒雲母片は、帯に沿った帯境界をもつキックを形成している。図において、このキックの指示する剪断センスは、帯に沿った左横ずれである。

したがって、方解石脈は、帯に沿った左横ずれ剪断運動によって形成されたものと考えられる。方解石脈は、配列方位によって、4セットに区分できよう(図版-12d): 図の両端に発達する太い方解石脈の配列方向=Cvgtに対して反時計廻りで低角度で斜交する方位(Rセット), 図のほぼ中央に位置する石英粒に発達するレンズ状方解石脈の配列方位=Cvgtに対して反時計廻りで中角度で斜交する方位(Tセット), Tセット方解石脈の左側に発達するごく薄い方解石脈の配列方位=Cvgtに平行(Yセット), Tセット方解石脈の下位に左下へ下がるように発達する方解石脈の配列方位=Cvgtに対して時計廻りで低角度で斜交する方位(Pセット)。粘土や砂岩を用いた剪断実験(shear experiment)によって、剪断場では、滑り面R1, R2, X, P, Y, 引張割れ目Tが形成されることが明らかにされてきた(e.g. Riedel, 1929²⁰⁾; Skempton, 1966¹²⁾; Tchalenko, 1970¹³⁾; Tchalenko & Ambraseys, 1970²¹⁾; Logan, et al., 1979²²⁾; Naylor et al., 1986¹⁴⁾; Moore et al., 1986¹⁵⁾; 原, 1998²³⁾参照)。黒雲母のキックの指示する剪断センスからすれば、図版-12dにおいて分類された4つのセットの方解石脈は、剪断変形実験で報告されてきた上記の構造群とよく対応するように見える。即ち、Rセットが滑り面R1, Tセットが引張割れ目T, Pセットが滑り面P, Yセットが滑り面Yなどに相当するクラックの開口を反映した現象であると説明出来る。図版-12eは、ここでは、R1とTが卓越して残存したクラックであることを示している。方解石脈の厚さからもまた、クラックの開口は、R1とTにおいて顕著であったということが出来る。

このような剪断変形実験で報告されてきた面構造に対比できる組織は、他の位置(=1つの細い平滑な帯の中に連続性に乏しい薄い方解石脈群が発達するところ)でも観察される。図版-13a, 図版-13c, 図版-14a, 図版-14c, 図版-15, 図版-16が、次にここで記載する例である。図版-13a(図版-13b)においては、Cvgt方向(=Y相当の方向)にある2つの方解石脈が、雁行状の方解石脈の発達する領域で接合してステップ構造を形成している。ステップ領域の雁行状の方解石脈の延長上に黒雲母片がある時、方解石脈は、黒雲母片のキック帯あるいは(001)面に沿った滑り面に連続している。キック帯に沿った剪断センスは、Cvgtに沿った方解石脈の剪断センスと調和的で、図版で見ると右横ずれである。したがって、雁行状の方解石脈は、引張割れ目Tではなく、滑り面R1の開口したものと考えられる。(001)面が圧縮応力の作用方向にある黒雲母には、2つのR1面(方解石脈)の間で、圧縮応力の作用方向に高角度な軸面を持つ褶曲が形成されている。ここでは方解石脈の壁を構成するクラックの主体は、滑り面Yと滑り面R1の階段状連結によるものであるということができよう。

図版-13c(図版-13d)においても、クラックの形成に関わる剪断変形のセンスは、黒雲母のキック帯から、左横ずれであると推定される。中央部の黒雲母片のキ

ク帯の帯境界は、ヒールド・クラックに連続している。したがって、このヒールド・クラックはモードIIと見なされる。剪断センスとCvgtに対する配置から、この方向のヒールド・クラックおよびこれと平行な方位を持つ方解石脈の壁は、R1相当のクラックであると考えられる。この方向のヒールド・クラックよりCvgtに対して高角度をなす短い方解石脈は、引張割れ目Tに相当する方向であるが、微弱である。図はまたCvgtに沿ったクラックが極めて顕著であることを示している。したがって、図版-13e及び図版-13c(図版-13d)からも読み取れるように、方解石脈の壁を構成するクラックは、主として滑り面R1とYであるということができる。

図版-14a(図版-14b)もまた、図版-13aの例と同様、Cvgt方向(=Y相当の方向)を持つ2つの方解石脈が、雁行状の方解石脈の発達する領域で接合してステップ構造を形成するものである。しかし、このステップでは、図版-13aの例とは違って、Y相当方解石脈にかなりのオーバーラップが認められる。オーバーラップが認められる位置で、2つのY相当方解石脈に挟まれた領域内に限って、雁行状の方解石脈が発達している。これらの雁行状の方解石脈は、pinnate fracture (e. g. Morgenstern & Tchalenko, 1967²⁰; Dunn et al., 1973²⁵)に似た配置を示している。しかし、ここでは、Y相当方解石脈に沿って大きな滑りがあったようには見えない。図版-14a(図版-14b)で下位から3番目の位置にある雁行状の方解石脈に接する黒雲母片は波動消光を示すが、これは方解石脈に沿った左横ずれセンスの滑りを反映した引きずり褶曲である。したがって、この3番目の雁行状方解石脈の形成は、滑り面R1に沿った開口によるものと考えられる。他の雁行状方解石脈については、脈に沿った滑りがあるのか無いのかは、判定のためのマーカーが無く、不明である。他の雁行状方解石脈は、3番目の雁行状方解石脈より、Y相当方解石脈に対して僅かに高角度をなして配列しているように見える。したがって、これら雁行状方解石脈は、引張割れ目T相当の構造である可能性も考えられる。

図版-14c(図版-14d)には、図の縦方向に、不連続ではあるがほぼ1つの面上に位置する方解石脈がある。この面の方向がCvgt方向(=Y相当の方向)である。この面上に位置する黒雲母片の示すキック帯は、面に沿った剪断センスが左横ずれであることを示している。これは、このY相当方解石脈の延長上の他の位置で決定された剪断センスと一致する。したがって、この位置でも、図版-14a(図版-14b)の場合と同様、引張割れ目T相当あるいは滑り面R1に沿った開口による薄い雁行状方解石脈が発達するということができる。図版-14c(図版-14d)ではまた、下位のY相当方解石脈の末端において、滑り面Pに沿った開口によるものと考えられる薄い方解石脈が認められる。

同じような雁行状方解石脈は、図版-9aの左横ずれ低角度断層セット(=Y相当断層)を構成する方解石脈

にも認められる。図版-9aの交差部より左側で左横ずれ低角度断層セットを構成する方解石脈群の構造は、図版-14cに見られるそれに良く似たものである。図版-9aの雁行状方解石脈の方向は、共役断層セットの鋭角2等分線に平行ではない。このことは、図版-9aの雁行状方解石脈が、axial crack(=T相当クラック)に比較できる方位にはなく、Y相当断層に対してT相当クラックより低角度をなすものであることを示している。即ち、配列方位からすれば、雁行状方解石脈はR1相当クラック起源の方解石脈であるように見える。このことは、図版-14a、図版-14cの雁行状方解石脈もまた、R1相当クラック起源である可能性を示唆するものである。

図版-15a(図版-15b)は、微細鉱物ダストの充填するヒールド・クラックが本試料中で最も明瞭に観察された例である。ここで方解石脈の壁とヒールド・クラックの配列方位を、別個に測定し図示したものが図版-15cと図版-15dである。ここでのCvgtに沿った剪断センスは左横ずれであるが、このようなセンスの変形は、図の右上部中央よりの黒褐色黒雲母のキック帯からも読み取れる。ここで、剪断センスに対する、方解石脈の壁とヒールド・クラックの配列方位は、前頁で引用した剪断変形実験で報告されてきた構造群とよく対応するように見える。即ち、Rセット(図中にRで示した方向の壁とヒールド・クラック)が滑り面R1、Pセット(図中にPで示した方向の壁とヒールド・クラック)が滑り面P、Yセット(図中にYで示した方向の壁とヒールド・クラック)が滑り面Yに相当する。ここでは、引張割れ目T相当の構造は認められないように見える。方解石脈の壁とヒールド・クラックの配列方位は、異なるパターンを示している。写真(スケッチ)にも見られるように、後者ではR1相当ヒールド・クラックが卓越している。これに対して、方解石脈はR1相当の壁だけが卓越するようには形成されていない。Y相当のヒールド・クラックは微弱であっても、Y相当の方解石脈は明瞭に形成されている。P相当のヒールド・クラックは3本しか認められないが、その一部が方解石脈となっている。

図版-16a(図版-16b)は、2つの細い帯に沿って薄い方解石脈が網の目状に発達するものである。この2つの帯はその延長線上(=Cvgt)で2つのやや厚い方解石脈に変化している。2つのやや厚い方解石脈となっている位置で、黒雲母の褶曲形態から、Cvgtに沿った剪断センスは、右横ずれであると判断される。図でCvgtは水平である。この網の目状の方解石脈の配列パターンは、帯に沿った右横ずれ剪断との対応で見ると、横ずれ断層帯で記載されてきた構造群(e. g. Tchalenko & Ambraseys, 1970²¹ 参照)のそれによく似ている。即ち、Cvgtに対して、左上から右下へ斜めに走る方解石脈は、R1相当、水平な方解石脈はY相当、左下から右上に斜めに走る方解石脈はP相当の構造を反映したものと見ることが出来る。

以上に記載した資料から、細い帯内に分布する連続性に乏しい薄い方解石脈の壁を構成するクラックとその脈の近傍に発達するヒールド・クラックの示す配列パターンは、粘土や砂岩を用いた剪断変形実験によって剪断場で出現するとされた滑り面R1, P, Y, 引張割れ目Tの配列パターンに対比される特徴を示すということ、そして、これらの配列パターンが、厚い連続性のよい方解石脈の壁を構成するクラックとその近傍に発達するヒールド・クラックのそれとは、しばしば異なることが明らかになった。即ち、後者の方解石脈の壁を構成するクラックの配列パターンは、図-6と図-8dでは、前者のそれに類似したものであるが、これら以外の厚い連続性の良い方解石脈の壁を構成するクラック(例:図-7と図-8a, b, c)とそれらの近傍に発達するヒールド・クラック(例:図-4, 図-5)は、Cvgtの周りに高い集中を示すという特徴が明瞭である。図-6と図-8dの例でも石英中のヒールド・クラックは、Cvgtの周りに集中を示している。

ここで、石英と長石に見られるヒールド・クラックの配列パターンの相違について、別の視点からの指摘が可能になったことは明らかである。長石のヒールド・クラックには、しばしば微細な白色葉片状鉱物のフィルムが認められる。これは、長石中にクラックが発生した時、クラックの壁に沿った変質が容易に起こることを示すものである。この変質は、早期に出現したクラックを残すことに繋がるはずである。石英と長石に見られるヒールド・クラックの配列パターンの相違には、このような現象も関わっている可能性がある。図-7に見られる長石のヒールド・クラックの主体の配列方位が、Cvgtに斜交し、R1相当の方向を示すのは、長石におけるこのような現象の好例であろう。

2.6 クラックのヒーリングと充填

上記の資料でも明らかなように、断層に関わる変形は、石英や長石におけるクラックの形成とその開口、そのヒーリング(healing)と他種鉱物の充填を通して起こっている。開口したクラックのヒーリングと充填は、通過する流体の性質を反映して、時間的空間的な変化を示しながら起こっている。図版-1, 図版-2, 図版-3 a~cでは、共役関係にある脈が、ともに方解石脈であるが、図版-3 dでは白色鉱物脈が共役関係を持って発達している。図版-5 d, 図版-6 cにおいては、断層としての1つの脈の中に、方解石で充填された部分と、白色葉片状鉱物で充填された部分がある。

図版-17a(図版-17b)において、右上から左下隅にかけて発達するやや厚いクラックは、左下隅付近では方解石が、その上位では主として斜長石が充填している。更にもその上位から右上端までのクラックは、中央部を方解石、その両側を斜長石が充填する構造を示す。図から、クラックに析出した鉱物種の時間的空間的な変化は明瞭である。同じような現象は、図版-17c(図版-17d)に

おいても認められる。ここでは、石英中のクラックは方解石で充填されているのに対して、斜長石中のクラックは斜長石と方解石で充填されている。斜長石中のクラックを充填する斜長石と方解石は、2回のクラック形成時に別々に析出したもので、斜長石の充填するクラックがより早期に形成されたことが読み取れる。図版-17a(図版-17b)と図版-17c(図版-17d)から読み取れる現象は同じである: 1) クラックの開口は少なくとも2回にわたっている, 2) 斜長石中では早期のクラックには斜長石が析出した, 3) 斜長石中では後期にある位置では引き続き斜長石が析出したが、別の位置では方解石が析出した, 4) 石英中のクラックには早期においても後期においても方解石が析出した, 5) 石英と接する斜長石では粒界近傍のクラックには方解石が析出した。

図版-10a~cでは、断層としてのやや厚い方解石脈(一部は白色鉱物脈)の周辺に形成される断層としての微細クラックを充填する鉱物の主体は、白色葉片状鉱物である。長石中のクラックに白色葉片状鉱物が認められることは多いが、石英や黒雲母中のクラックにも白色葉片状鉱物が認められる。図版-10dにはヒールド・クラックが黒色微細鉱物ダストで充填されている例を見ることが出来る。上記の資料は、クラックに析出する鉱物が、狭い範囲内でまた時間の経過の中で変化したことを示すものである。

ここで指摘すべき更に重要なことは、図版-17のようなクラックを充填する鉱物種が母晶の鉱物種に依存しながら狭い範囲で変化するものと、長い断層全体が方解石または白色葉片状鉱物で充填されているものとの違いである。後者が、流体の移動が長距離にわたって容易であったことを反映した現象であることは明らかである。試料内を通して流体の移動の容易さは一様ではなかったということである。この問題は別稿において検討したい。

図版-17aの斜長石-方解石重複脈中央部の方解石脈壁には、長いクラックと短いクラックの階段状連結が明瞭である。クラックは少なくとも2つのセットで構成されているように見える。長いクラックは脈の平均的なトレンドに低角度であり、雁行性を示し、R1構造方向であるように見える。このクラックに斜長石脈の外形を構成する壁に連続するものがあることは、脈の形成過程を通してR1のクラックが成長した可能性を示唆するものであろう。

図版-17c(図版-17d)においては、石英中の方解石脈の階段状のずれが、脈に高角度をなすクラックが発達していたことを示している。この図版はまた、脈に高角度をなすクラックのすべてが残存したわけではなく、開口後にクラックがヒールされ消滅したことをも明瞭に示している。この図版はまた、クラックが1つの共役系を形成するように発達したことを明瞭に示している。

2.7 クラックの開口と断層の成長

1つの細いほぼ平滑な帯に分布する連続性に乏しい薄

い方解石脈群が発達するところでは、帯中に観察されるヒールド・クラックと方解石脈群の壁の配列パターンは、剪断実験によって剪断場で出現するとされた滑り面R1, P, Y, 引張割れ目Tの配列パターンに対比される特徴を示すものである。ここで重要なことは、滑り面R1, P, Y, 引張割れ目Tに沿って形成された方解石脈群に、切った切られたという組織が認められていないことである。即ち、例えば、滑り面R1に沿った方解石脈群が、滑り面Yに沿った方解石脈群によって切断されたことを示すような組織は認められていない。Tchalenko (1970)¹³⁾は、差応力が増大し岩石が脆性的に破碎され through-going fault が形成されるまでの過程は、滑り面R1の形成、滑り面Pの形成、滑り面Yの形成という順序で起こることを明らかにしている。この結論にしたがえば、滑り面R1, P, Y, 引張割れ目Tに沿って形成された方解石脈群に、切った切られたという組織が認められていないということは、滑り面Yが出現する時期に、既存のクラックおよび形成されつつある滑り面Y相当クラックを開口することによって、すべての方解石脈群が同時に形成されたことを示すように見える。

このことから、断層としての方解石脈群の形成に関わる砂質片麻岩の早期の変形は、図-9のように、模式的に示すことができる。図-9aのような配列パターンを示すクラック群から、共役剪断帯内に、図-9bのように断層としてのやや連続性のよい方解石脈が発生したも

のと考えられる。断層としてのやや連続性のよい方解石脈は、早期に形成された滑り面R1, P相当クラック群と、出現しつつあるY相当クラック群との階段状連結によって形成された。この階段状連結において、でき得る限りその包絡面に沿う滑りが容易となるように——でき得る限り凹凸を小さくするように——, クラック群は選択されたはずである。断層としての厚い連続性のよい1つの方解石脈の壁の配列パターンが、図-6, 図-8dの例を例外として、Cvgtに沿う方向で極めて高くなっているのは、このためであろう(図-7, 図-8a, b, c)。

図-6, 図-8dの例では、連続性のよい方解石脈の壁の配列パターンは、3つの方位で高い頻度分布を示すものである。これらの高い頻度分布は、滑り面R1, P, Y相当クラックを反映していると見られる方位に位置している。しかし、方解石脈の壁を構成するクラックから直接的具体的に読み取れる組織は、滑り面R1, P, Y相当クラックの特徴を必ずしも残すもののように見えない。しかし、連続性のよい厚い方解石脈にも、その壁が、滑り面R1とP相当のクラックであったことを明瞭に残しているものがある。例えば図版-18c(図版-18d)の共役の方解石脈である。この図において、1つの方解石脈に接した黒雲母片のキンク帯の組織は、明瞭に左横ずれ剪断を示すものである。この黒雲母片のすぐ上で、方解石脈の壁を構成するクラックは、明瞭な階段状連結

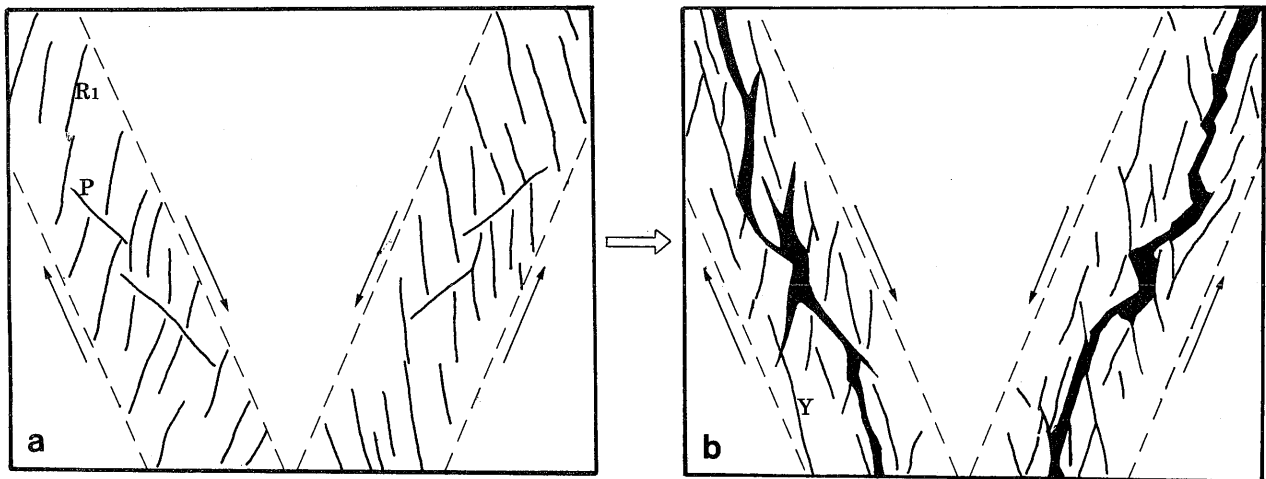


図-9 断層発達概念図。a: 共役剪断帯におけるR1クラックとPクラックの形成。b: 流体圧の増大下でのYクラックの発生—成長とそれに伴うクラックの開口による方解石充填脈、白色葉片状鉱物充填脈の形成。おそらくY相当クラックの発達が微弱なところで形成された微弱な脈の壁は、Yクラックと同様にR1クラックとPクラックで構成されているのに対して、Y相当クラックの発達が顕著なところで形成された厚い脈の壁と脈の周辺の石英中のヒールド・クラックは、既存のR1クラックとPクラックの消滅を示して、主にYクラックで構成されている。

Fig. 9 Conceptualized diagram of development of faults. a: propagation of R1 cracks and P cracks in conjugate shear zones. b: nucleation - growth of Y cracks under increasing fluid pressure, associating the formation of calcite - filled veins which is related to opening of cracks. The walls of tiny veins, which probably formed under the weak development of Y cracks, are constructed with R1 cracks and P cracks as well as Y cracks, while those of thick veins, which probably formed under the strong development of Y cracks, and healed cracks in their surrounding quartz grains are mainly constructed with Y cracks, showing disappearance of the pre-existing R1 and P cracks.

を示すが、このクラックは壁から周囲の鉱物粒へと広がっている。階段を形作る長いクラックは、雁行状であり、剪断センスとの対応において見る時、滑り面R1相当の配列を示すクラックである。このR1に沿った滑りと対応するように、滑り面直下の斜長石中に帯状に、二次的な雁行状R1クラック群が形成されている(図版-18b)。この方解石脈と共役関係にあるいま1つの方解石脈においても、滑り面PとR1相当クラックによる逆センスの階段状構造が明瞭である(図版-18a)。

以上の解析結果から、この試料での断層の成長は、滑り面R1, P, Y相当クラックの発生から、through-going faultの形成と開口、更に方解石脈(白色鉱物脈, 斜長石脈)の形成というプロセスとして起こっている(図-9)。その過程において、方解石脈(白色鉱物脈, 斜長石脈)の壁の階段状連結において、でき得る限りその包絡面に沿う滑りが容易となるように——でき得る限り凹凸を小さくするように——、クラック群は選択されたと結論することができよう。しかし、図版-17aから読み取ったように、Y相当クラック形成時の開口現象は、早期に発生したR1相当クラックの継続的(活動)を伴うものであった。他の試料に見られるR1開口(=方解石脈)も同様の現象を示すものである。

主断層としての方解石脈(白色鉱物脈, 斜長石脈)近傍においても、発生したクラックのかなりの部分は、顕微鏡下で識別出来ないほどに消滅した。図-6と図-7の試料の石英中に観察可能なヒールド・クラックとして残存したものの配列パターンは、Cvgtに沿ったものが極度に卓越するように残存したことを示している。このことは、石英中では、滑り面Y相当のクラックが卓越的に残存するような現象があったということなのであろう。共役断層の交差部においても、断層に沿った滑り面Y相当のヒールド・クラックの残存が明瞭である(図版-18a, b, 図版-17c)。これは、方解石脈(白色鉱物脈, 斜長石脈)の形成をもたらすような流体移動の顕著な時期が、滑り面Y相当クラックの形成時期であったことを反映した現象なのであろう。この時期はまた、図版-17cからも明らかなように、既存クラックの多くをヒールド消滅させたのである。厚い連続性の良いより平滑な方解石脈の形成には、Y相当クラックの形成が顕微であったという条件が関わっているであろう。

しかし、長石においては、クラックの形成は、しばしば、クラックに沿った変質作用を伴うように起った。このため早期に出現したクラックも白色葉片状鉱物充填フィルムとして残存した。長石中のヒールドクラックには、図-6の例のように、石英中のものとは違って、R1相当方向を示すものが卓越するのである。

2.8 断層の成長と断層の開口

以上の解析により、滑り面Y相当クラックの発生時に、既存クラックの一部もまた開口し、断層が出現したことが明らかとなった。次に断層の成長がもたらした現象を

記載しよう。この試料には、断層の成長(=Y相当クラックの滑り)が、断層の大きな開口へと繋がったことを示す明瞭な例がある。このような現象を記載する。1つの例は図版-19に示したものである。ここでは、共役系を構成する方解石脈は厚さに関して著しく非対称である。左上から右下へ向かうトレンドを持つ方解石脈は極めて薄いのに対して、右上から左下へ向かうトレンドを持つ方解石脈は左下へ向かって次第に厚くなり急激に閉じている(図版-19a, 図-10a)。閉じた位置より先(図の下方)には、連続性の悪い極めて薄い微弱な方解石脈と白色鉱物脈が発達する(図版-19b)。厚い方解石脈が閉じた先端部の母岩では、黒雲母はすべてキンク帯を形成している(図版-19bとc)。このキンク帯分布が示すこの位置の母岩の変形は、断層に沿った圧縮歪みである。

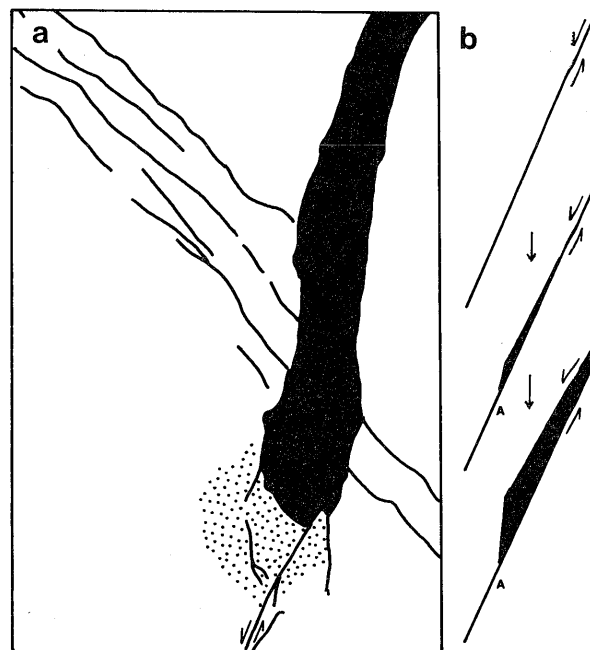


図-10 図版-19 aの共役方解石脈のスケッチ(a)と図版-19 aの左横ずれ剪断センスを示す厚い方解石脈の形成機構の概念図(b)。点Aにおいて断層滑りがロックされたことにより断層が開口し、方解石が析出するスペースが出現した。黒色：方解石脈，点々：黒雲母のキンク帯(図版-19bとc)から厚い方解石脈に沿った圧縮歪みが読み取れる領域。

Fig.10 (a) a sketch of conjugate calcite veins, whose microphotograph is shown in Plate-19a, and (b) conceptualized diagram of formation mechanism of the thick calcite vein shown in Plate-19 a, which is a microfault with left-lateral shear sense. The locking of fault slip at the position A during faulting resulted in opening of the fault, which formed a space filled with calcite grains. Black: calcite veins, stippled domain: domain showing compressive strain in a direction parallel to the thick calcite vein, as read from kink bands in biotite flakes (see Plate-19 b and c).

そこで問題は、厚い方解石脈が急激に閉じた位置で、なぜ母岩に断層に沿った圧縮歪みをもたらす変形が起こったかである。図-10bがこの問題に対する解答モデルである：断層に沿った左横ずれセンスの滑りが、途中の点Aでロックされたために、断層に沿った滑りは、点Aより上位に図のような空隙を発生させた。このような空隙を埋めるようにして方解石脈が形成された。方解石脈が急激に閉じた位置での断層に沿った圧縮歪みは、空隙の成長と断層に沿った変位を反映した現象であろう。この厚い方解石脈の形成モデルは、Hutton (1982)²⁰⁾のDonegal花崗岩体の貫入モデルに対比されるものである。点Aより上位では連結したクラックに沿った滑りは容易であったが、それより下位ではクラックは、それに沿った滑りを容易にするようには連結しなかった。このことは、点Aより下位で、連続性のない極めて薄い微弱な方解石脈と白色鉍物脈が発達することから読み取れることである。

いま1つの例は、図版-20aの共役的な白色鉍物脈である。右上から左下へ走る平滑な白色鉍物脈では、白色葉片状鉍物の形態定向配列は明確である(図版-20b)。白色葉片状鉍物の形態定向配列によって示される片理は、歪みのXY面に相当する構造である(e.g. Ramsay, 1967²¹⁾; 原, 1998²³⁾参照)。白色葉片状鉍物の形態定向配列の方位は脈のトレンドに低角度で斜交している。脈に対する白色葉片状鉍物の作る片理のこのような配列は、脈に沿った左横ずれ剪断場での白色葉片状鉍物の再結晶を示唆するものである(e.g. Ramsay, 1967²¹⁾; 原, 1998²³⁾参照)。このような剪断を示す白色鉍物脈(左センス・セット)は、周囲の断層としての方解石脈、白色鉍物脈から求められた応力場に対して、調和的關係にある。そして、左上から右下へ走るいま1つの白色鉍物脈(右センス・セット)は、右横ずれセンスを持つ断層として発生したと考えられる方位を示している。しかし、両セットの間で、白色葉片状鉍物の組織は全く異なっている。

左センス・セットは薄く、それに対して右センス・セットは著しく厚い(図版-20a)。図-11は両セットのスケッチである。右センス・セットは交差部(intersection zone)において分岐している。分岐のパターンは、分岐脈がより圧縮応力の作用方向に平行となるように形成される特徴を示すが、左センス・セットの上盤側と下盤側で全く異なっており、対応関係にはない。図版-20cとdは、右センス・セットを充填する白色葉片状鉍物の組織を示すものである。図から、右センス・セットでは、白色葉片状鉍物は、歪のXY面相当の形態定向配列を示さないことが読み取れる。ここでは、白色葉片状鉍物は、球顆状組織を示している。分岐断層においても白色葉片状鉍物は球顆状組織を示している。このことは、右センス・セットにおける断層の開きが、断層に沿った滑りが

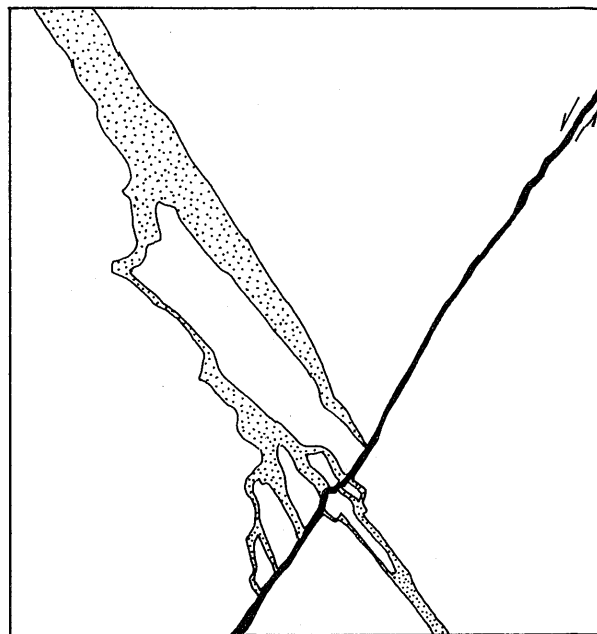


図-11 図版-20の共役白色鉍物脈のスケッチ。黒色脈は白色葉片状鉍物が形態定向配列(片理)を示す(図版-20b)。片理の配列パターンから脈に沿った左横ずれ剪断が読み取れる。点々の脈：白色葉片状鉍物が球顆状構造を示し片理を示さない厚い脈。黒色の脈に接する位置で分岐を示す。

Fig.11 A sketch of conjugate sets of white flaky mineral-filled veins (black vein and stippled vein), whose microphotograph is shown in Plate-20. The black vein is characterized by the preferred dimensional orientation (schistosity) of white flaky mineral (Plate-20b), which is related to the left-lateral shear strain along the vein. The stippled vein is characterized by spherulitic textures of white flaky mineral (Plate-20c) and by its splaying in the vicinity of the black vein.

無視できる程度の条件下で起こっていることを示唆する。しかし、右センス・セットが左センス・セットと交差する位置では、左センス・セットから連続する白色葉片状鉍物の形態定向配列としての片理が認められる(図版-20c)。このことは、白色葉片状鉍物が析出した時相において、右センス・セットは、左センス・セットの滑りによって切断された関係にあったものと考えられる。即ち、左センス・セットに沿った滑りが、右センス・セットに沿った滑りをロックしていた。そして、白色葉片状鉍物の球顆状組織と断層の分岐パターンから、右センス・セットの断層は、滑りがロックされた条件下で、断層の分岐と開口が起こったものと考えられる。断層としての方解石脈、白色鉍物脈の形成が、滑り面Yの出現する条件下で卓越的に進行したことは、これらの資料からも明らかである。

3. 考察と結論

以上において解析記載した断層の微細組織の特徴は次のように要約できよう。断層は約 50° で交わる2つの共役セットであり、断層に沿った剪断センスから、その鋭角2等分線方向に形成に関わる最大圧縮応力の作用方向が位置するものと結論される。断層は、それらに沿って方解石、白色葉片状鉱物、斜長石が充填する細脈として観察される複合断層の特徴を示すものである。断層の発生-成長において、石英、斜長石、カリ長石はクラックの形成とその開口として変形し、黒雲母はキンク帯の形成と帯境界の開口、(001)面に沿った滑りと開口、(001)面に直交するクラックの形成とその開口として変形している。また、これらの鉱物の粒界に沿ったクラックの形成とその開口も認められる。断層の発生-成長において発生したこれらのクラックは、現在では、微細鉱物ダストの充填するヒールド・クラック、方解石脈、白色鉱物脈、斜長石脈の壁として残存しており、顕微鏡下で観察される。断層の形成に関わる変形が微弱なところで読み取れる断層の形成にいたる初期段階の変形は、Skempton (1966)¹²⁾、Tchalenko (1970)¹³⁾、Logan et al. (1979)²²⁾、Moore et al. (1986)¹⁵⁾ などによる剪断変形実験で確認されてきた現象に酷似するものである。即ち、共役断層の各セットにおける変形プロセスは、滑り面R1相当クラックの形成、滑り面P相当クラックの形成、滑り面Y相当クラックの形成として起こり、Y相当のクラックの形成時相に、クラックの開口があり、岩石を通して移動する流体から開口クラックに方解石、白色葉片状鉱物、斜長石の析出があった。この時相に断層の成長があった。引張割れ目T相当クラックも僅かに認められるが、その形成時相は特定できていない。

断層が厚い連続性の良い方解石脈として認められるところでは、方解石脈の壁を構成するクラックは、脈の平均的なトレンド (=滑り面Y方向=through-going fault) に沿うものが卓越している。即ち、脈の壁を構成するクラックの階段状連結においては、壁の平均的形態が、出来るだけギザギザの少ない平滑な面となるように、滑り面Y相当クラックが卓越するようにクラックの選択が行われた。このような脈の周辺の石英粒中に見られるヒールド・クラックの主体もまた、滑り面Y相当クラックが卓越するという特徴を示す。流体の移動が顕著な場、そして水圧破砕が起るほどに高い流体圧の働いている場においては、through-going faultの形成と開口は、滑り面Y相当クラックが卓越的に残存し、既存の滑り面R1相当クラック、滑り面P相当クラックを消滅させるような現象とともに起こったようである。しかし、クラックの壁に沿った変質の起こりやすい長石には、早期に出現したR1相当クラックの残存が認められる。

ここで解析した試料の砂質片麻岩は、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母からなり、やや細粒で弱い片麻構造を

示すものであり、花崗岩などの低空隙率結晶質岩 (low-porosity crystalline rocks) に相当する組織の特徴をもつ岩石である。しかし、上記のような断層の微細組織は、花崗岩などの結晶質岩シリンダーを用いた圧縮実験において観察された断層の微細組織とは大きく異なっているように見える。例えば、Peng & Johnson (1972)⁸⁾ は、封圧下でChelmsford graniteシリンダーの圧縮実験を行い、「it is reasonable to assume that, at the moment of gross failure, the areas between the parallel cracks (axial cracks) behaved as tiny columns or beams of rectangular cross section. The lateral deflection and failure of the tiny columns or beams, aligned along paths of faults in specimens of Chelmsford granite, could account for development of the faults」と結論している。圧縮応力の作用方向に平行なaxial cracksの形成とその崩壊という断層形成プロセスは、Westerly graniteシリンダーを用いたWong (1982)⁹⁾、コートツァイト・シリンダーを用いたHallbauer et al. (1973)⁷⁾ などによる封圧下での圧縮実験においても観察されている。他方、封圧下でBerea 砂岩シリンダーの圧縮実験を行ったMenendez et al. (1996)¹¹⁾ は、「Near the peak stress, intragranular cracking initiates from grain contacts and this type of Hertzian fracture first develops in isolated clusters, and their subsequent coalescence results in shear localization in the post-failure stage」と結論している。以上のような現象は、ここで記載した試料に見られる断層の発生-成長に関わる微細機構とは明瞭に異なるものである。

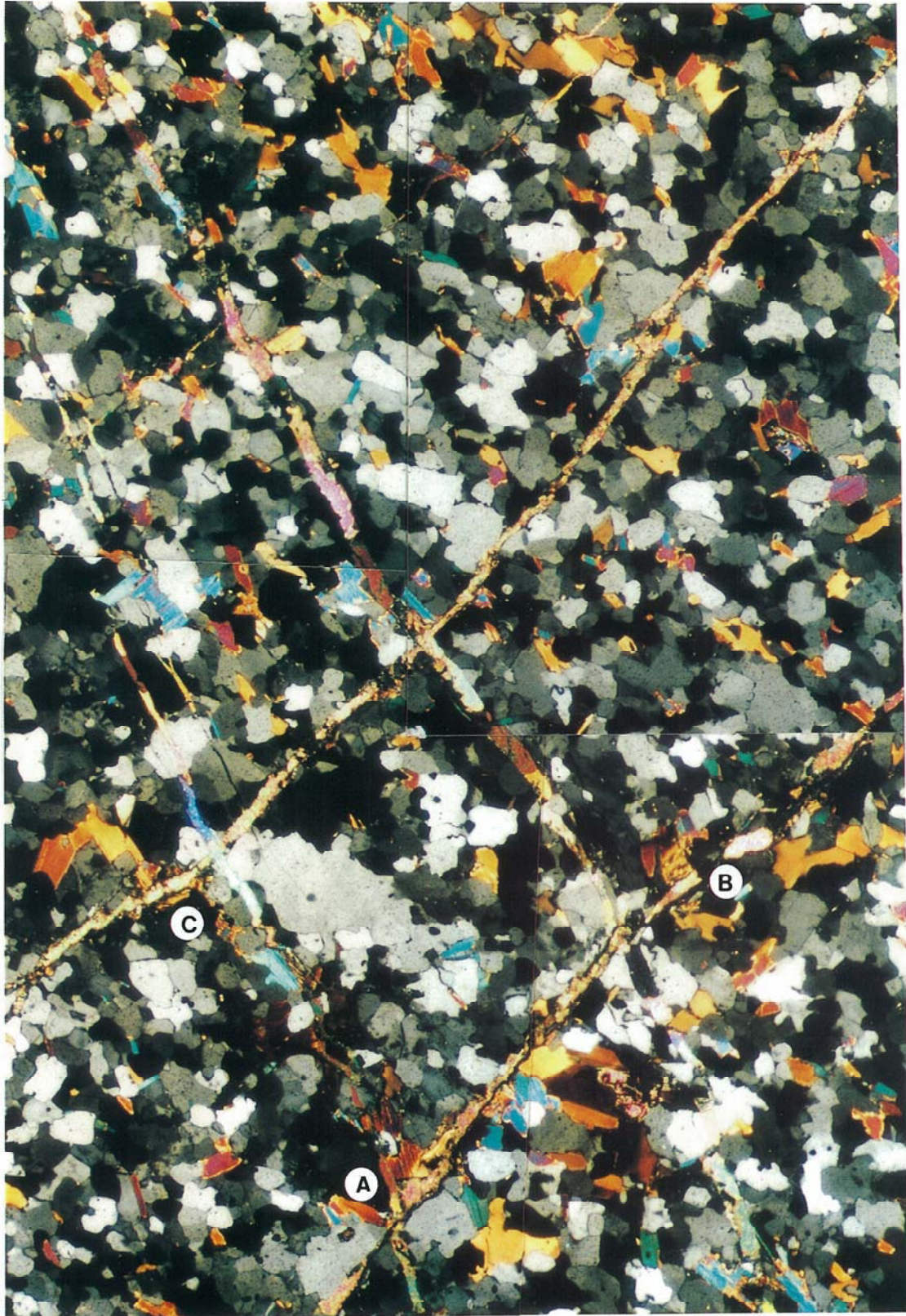
Wong (1982)⁹⁾ は、圧縮軸に対して $15^\circ - 45^\circ$ 程度斜交するクラックに沿う滑りがまた、axial cracksの構造の崩壊による断層の形成に関わることを報告している。これに対して、圧縮応力の作用方向に斜交する既存のキズが、axial cracksの発生する位置を規定するように起こり、このような方位にある既存のキズとaxial cracksの階段状結合が断層へと成長するという見方もある(e.g. Horii & Nemat-Nasser, 1986²⁾)。また、封圧下でのWesterly graniteシリンダーの圧縮実験の結果を基礎にMoore & Lockner (1995)¹⁰⁾ が示した脆性断層の微細機構モデルでは、クラックの形成が、断層の発生-成長に関わる狭い剪断帯に限定されるように起こる。「suitably oriented grain boundaries and relatively weak crystals such as biotite (Kronenberg et al., 1990²⁸⁾) may, where encountered, provide a means for the fault to return to its overall propagation path」のであり、断層の成長は、「Following initiation of the shear fracture, microcracking becomes concentrated in a process zone that extends at least 8-10mm in front of the fracture tip, and these microcracks are oriented, on average, at 30° to the fault strike. ...The microcrack fabric and density

variations in the process zone facilitate the development of fault segments that trend away from the average fault strike towards the dilational quadrant. After following such a path for some distance, the propagating shear must eventually reverse directions, in order to maintain an overall in-plane propagation path. The result is a zig-zag pattern of fault segments, …」と説明されている。Moore & Locknerのプロセス・ゾーンに形成されるクラックは、「principally tensile cracks whose orientations reflect the local stress field」である。ここで記載した試料でも、クラックの形成は狭い剪断帯に起こっている。しかし、狭い剪断帯に出現したクラックの中で、剪断センスと同じ回転センスで測定した時、帯に低角度をなすクラックは、しばしば同じ剪断センスの滑りを示すものであり、むしろ滑り面R1相当クラックと見なされるものである。引張割れ目Tに相当するクラックは、稀にのみ観察される構造である。狭い剪断帯に出現したクラックの特徴は、図-9の模式図に示したように、Moore & Lockner (1995)¹⁰⁾のモデル、Horii & Nemat-Nasser (1985)²⁾のモデル、Wong (1982)³⁾のモデルのそれには比較できないものである。

参 考 文 献

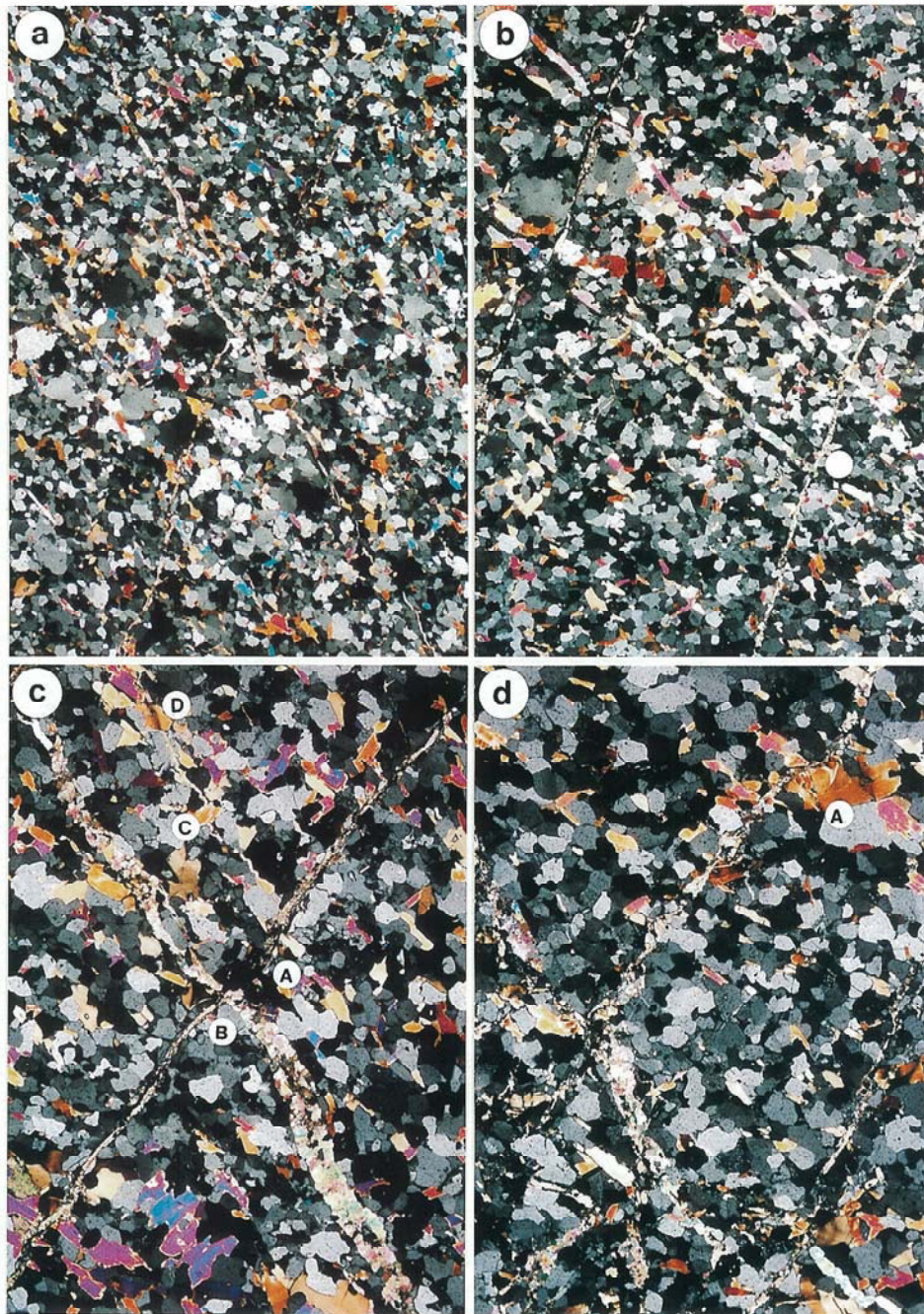
- 1) 三本健四郎・山根 誠・吉田 浩・岡野 肇・妹尾 洋一・原 郁夫 (2000): つくば技術開発センター1350mボーリングコアの地質学 (1) 基盤岩類の地質概観. 応用地質技術年報. No.20, p. 43-86.
- 2) Horii, H., and Nemat-Nasser, H. (1985): Compression-induced microcrack growth in brittle solids: axial splitting and shear failure. *Jour. Geophys. Res.* vol.90, no.84, p.3105-3125.
- 3) Wong, T. F. (1982): Micromechanics of faulting in Westerly granite. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* vol.19, p.49-64.
- 4) Bieniawski, Z. T. (1967): Mechanism of brittle fracture of rock. Part II Experimental study. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.*, 4, 407-423.
- 5) Scholz, C. H. (1968): Experimental study of the fracturing process in brittle rock, *Jour. Geophys. Res.* vol.73, p.1417-1454.
- 6) Friedman, M., Perkins, R. D., and Green, S. J. (1970): Observation of brittle deformation features: fractures at the maximum stress of Westerly granite and Solenhofen limestone, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.* vol.7, p.297-306.
- 7) Haullbauer, D. K., Wagner, H., and Cook, N. G. W. (1973): Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, vol.10, p.713-726.
- 8) Peng, S. S., and Johnson, A. M. (1972): Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.* vol.9, p.37-86.
- 9) Tapponier, P., and Brace, W. F. (1976): Development of stress-induced microcracks in Westerly granite, *Int. Jour. Rock. Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* vol.13, p.103-112.
- 10) Moore, D. E., and Lockner, D. A. (1995): The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *Jour. Struct. Geol.* vol.17, no.1, p.95-114.
- 11) Menendez, B., Zhu, W., and Won, T. F. (1996): Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in Berea sandstone. *Jour. Struct. Geol.* vol. 18, no.1, p.1-16.
- 12) Skempton, A. W. (1966): Some observations on tectonic shear zones. *Proc. 1st Inter. Cong. Rock Mech.* vol.1, p.329-335.
- 13) Tchalenko, J. S. (1970): Similarities between shear zones of different magnitudes. *Bull. Geol. Soc. Am.* vol. 81, p.155-160.
- 14) Naylor, M. A., Mandl, G. and Sijpestein, C. H. K., (1986): Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Jour. Struct. Geol.* vol. 7(8), p.737-752.
- 15) Moore, D.E., Summers, R. and Byerlee, J.D. (1986): The effect of sliding velocity on the frictional and physical properties of heated fault gauge. in [internal Structures of Fault Zones] edited by Chi-yuen Wang. Basel, Birkhauser Verlag, p.31-52.
- 16) Griggs, D., and Handin, J. (1960): Observations on fracture and a hypothesis of earthquake in [Rock Deformation] edited by D. Griggs and J. Handin, *Mem. Geol. Soc. Am.*, 79, p.347-364.
- 17) Brace, W. F. (1964): Brittle fracture of rocks, in [State of Stress in the Earth's Crust] edited by W.R. Judd. New York, Elsevier, p.111-174.
- 18) Mogi, K., (1966): Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, vol.44, p.215-232.
- 19) Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J. (1996): *Microtectonics.* Berlin, Springer-Verlag, p.289.
- 20) Riedel, W. (1929): Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zent. Min. Geol. Pal.* p.354-368..
- 21) Tchalenko, J. S., and Ambraseys, N. N. (1970):

- Structural analysis of the Dasht-e Bayaz (Iran) earthquake fractures. *Bull. Geol. Soc. Am.*, vol. 81, p.41-60.
- 22) Logan, J. M., Friedman, M., Higgs, N.G., Dengo, C., and Shimamoto, T. (1979) : Experimental studies of simulated gouge and their application to studies of natural fault zones. *U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 70-1239*, p.305-343.
- 23) 原 郁夫 (1998) : 褶曲の見方. 深田研ライブラリー. No.11. 東京, 財団法人深田地質研究所, 225p.
- 24) Morgenstern, N. R., and Tchalenko, J. S. (1967) : Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear. *Geotechnique*, vol.17, p.309-328.
- 25) Dunn, D. E., Lafountan, L.J., and Jackson, R. E. (1973) : Porosity dependence and mechanism of brittle fracture in sandstones. *Geophys. Res.* vol.78, p.2403-2417.
- 26) Hutton, D. H. W., (1982) : A tectonic model for the emplacement of the Main Donegal granite, NW Ireland. *Jour. Geol. Soc. London*, vol.139, p.615-631.
- 27) Ramsay, J. G., (1967) : *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill. New York, 560p.
- 28) Kronenberg, A. K., Kirby, S. H., and Pinkston, J. (1990) : Basal slip and mechanical anisotropy of biotite. *Jour. Geophys. Res.* vol.95, p.19257-19278.



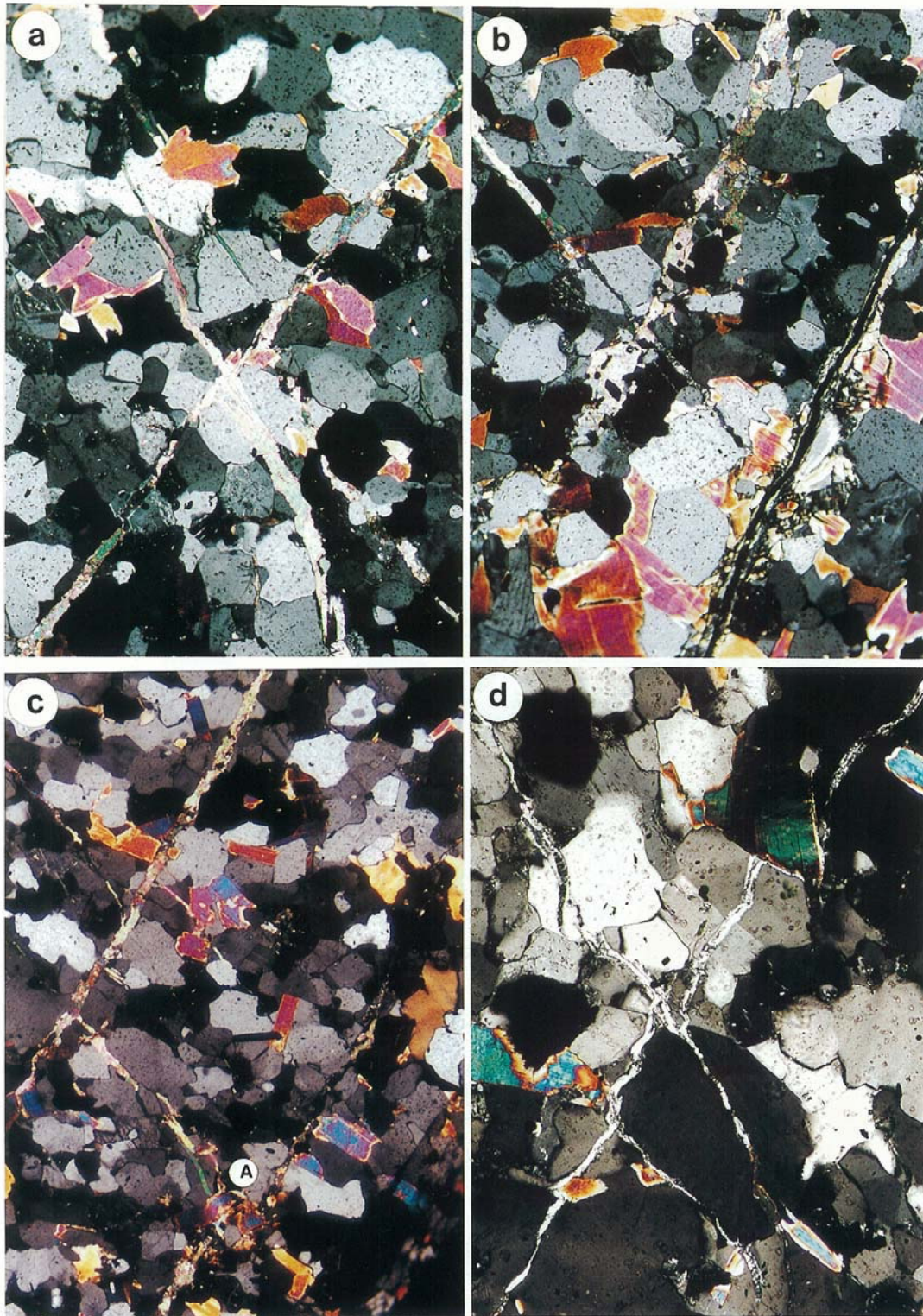
図版-1 微小断層としての共役方解石脈の顕微鏡写真。点A, B, C付近の拡大写真(図版-5a, b, c, 図版-18c(d))の黒雲母のキック帯から、方解石脈に沿った滑りセンスが明瞭に読み取れる。黒雲母のキック帯の配列パターンから読み取れる脈の形成に関わる圧縮応力の軸は、脈の鋭角2等分線方向-図版の長軸方向に平行である。

Plate-1 Microphotograph showing conjugate calcite veins as microfaults. From kink bands of biotite flakes in enlarged microphotographs around the points A, B and C, which are shown in Plate-5a(b) and c and Plate-18c(d), is clearly read the sense of slip along the veins. The axis of compressive stress for the formation of the calcite veins, as read from the orientation pattern of kink bands of biotite flakes, is in a direction parallel to their acute bisectrix, which is parallel to the long axis of this plate.



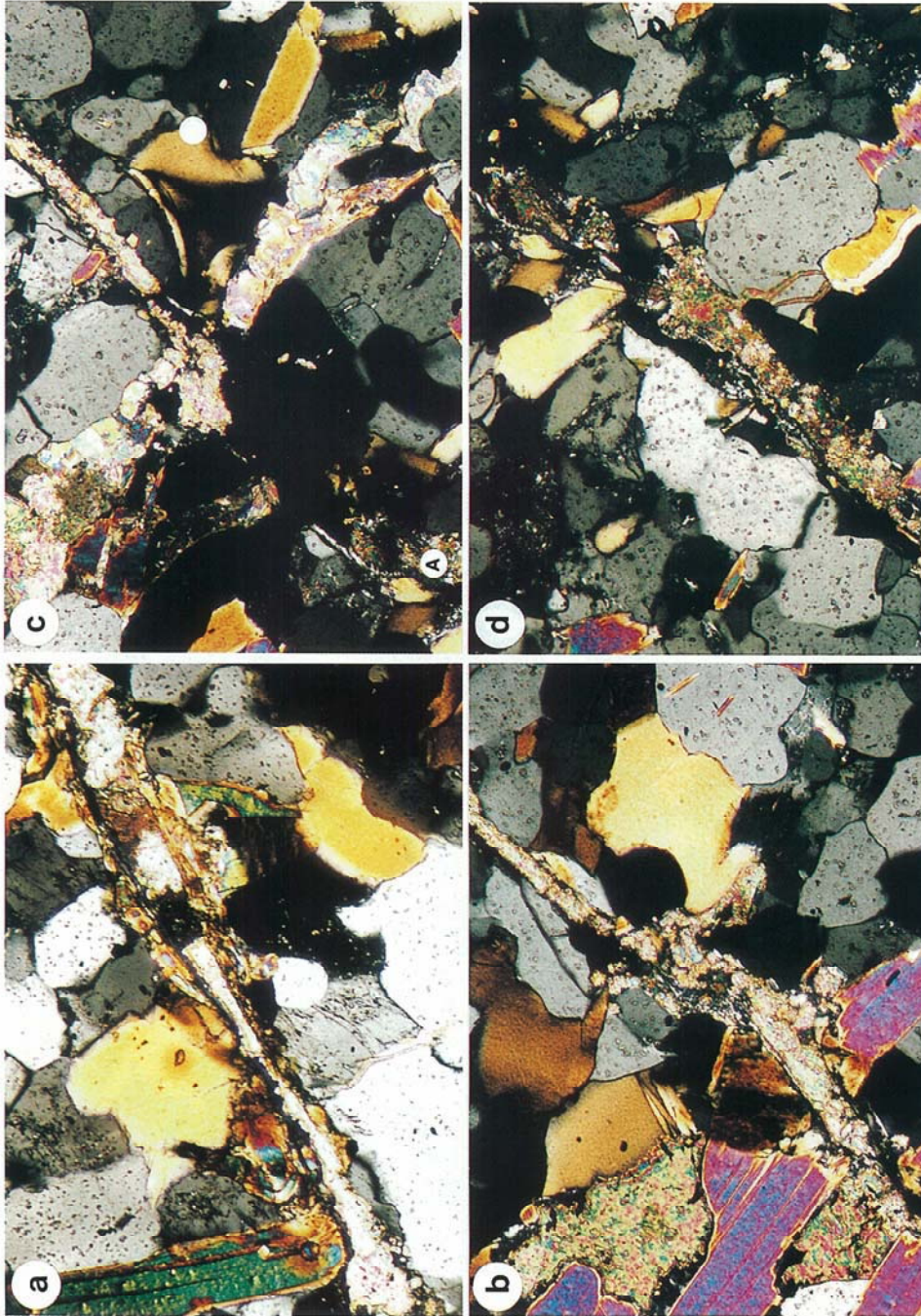
図版-2 微小断層としての共役方解石脈の顕微鏡写真。aの写真の共役方解石脈の周辺でヒールド・クラックをもつ鉱物粒の分布が解析された。結果は図-3と図-4に示されている。bの写真の点Aの周りの共役方解石脈の交差部（図版-5dが拡大写真）、cの写真の点A（図版-4dが拡大写真）と点B（図版-4cが拡大写真）、dの写真の点A（図版-6d）周辺の黒雲母帯のキンク帯から読み取れる、脈の形成に関わる圧縮応力の軸は、脈の鋭角2等分線方向=図版の長軸方向に平行である。cの写真のいまひとつの方解石脈と接触する黒雲母は、点C（図版-7aが拡大写真）では(001)面に平行及び垂直なクラックの形成によって、点Dではキンク帯の形成によって変形している。

Plate-2 Microphotographs showing conjugate calcite veins as microfaults. Around the conjugate calcite veins in the microphotograph (a) has been analyzed the distribution pattern of mineral grains with healed cracks, which is shown in Figs. 3 and 4. From kink bands of biotite flakes in the intersection zone of conjugate calcite veins around the point A (enlarged microphotograph of Plate-5d) of the microphotograph (b), those of the point A (enlarged microphotograph of Plate-4d) and point B (enlarged microphotograph of Plate-4c) in the microphotograph (c), and those around the point A (enlarged microphotograph of Plate-6d) in the microphotograph (d), the axis of compressive stress responsible for the formation of the conjugate calcite veins is in a direction parallel to their acute bisectrix, which is parallel to the long axis of this plate. In the microphotograph (c), biotite flakes in contact with another calcite vein are deformed by the formation of cracks parallel and normal to (001) plane at the point C and by kinking at the point D.



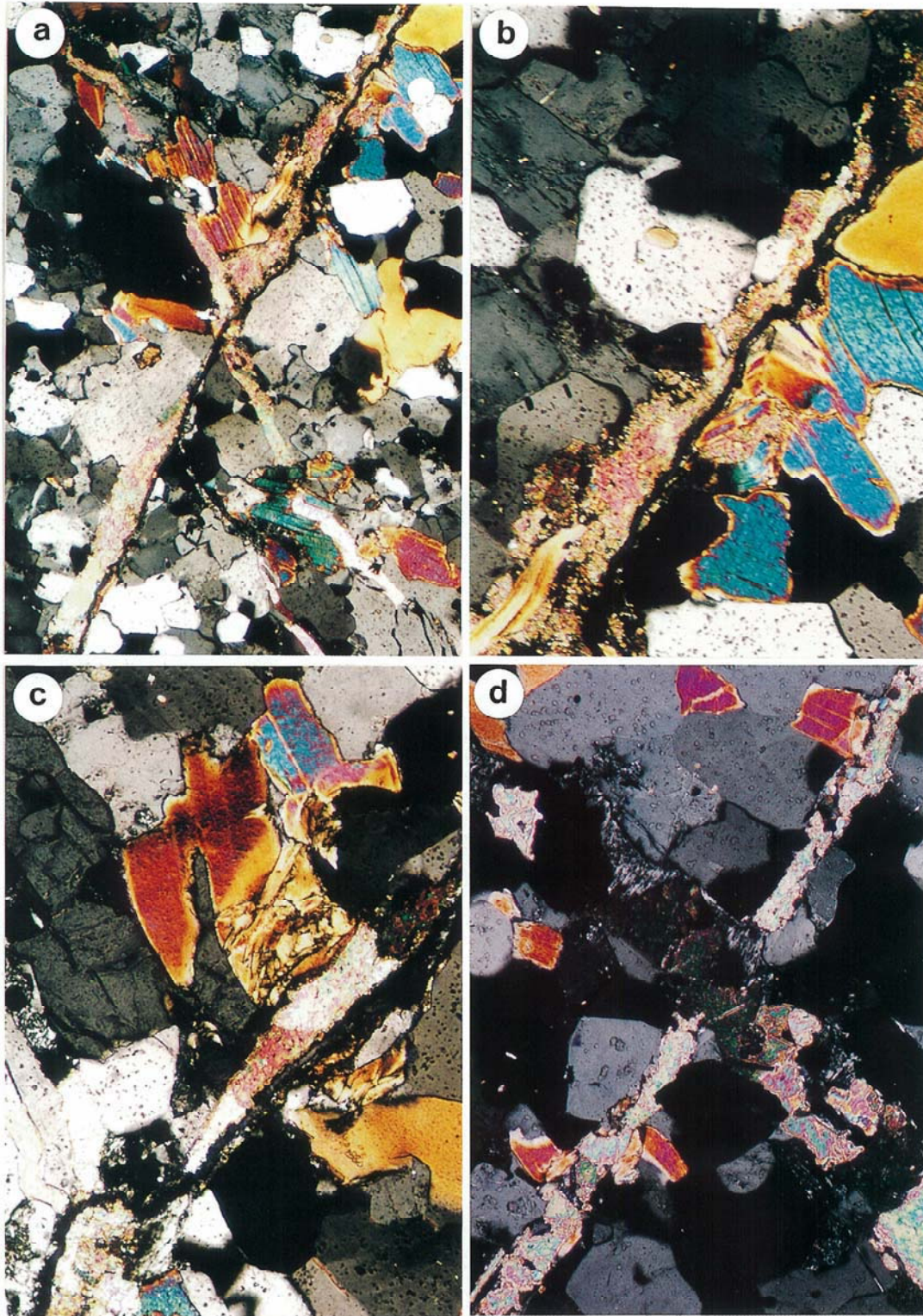
図版-3 微小断層としての共役方解石脈と共役白色鉱物脈の顕微鏡写真。aの写真の方解石脈周辺でヒールド・クラックの配列方位を解析(図-5)。bの写真には石英と長石の微小破砕片を含む方解石脈と脈近傍の黒雲母にキンク帯が認められる。cの写真において、点Aの共役方解石脈交差部の黒雲母の褶曲は、写真の長軸に沿った圧縮の下での、方解石脈に沿った滑りによる変形を示す。dの写真は共役白色鉱物脈を示す。

Plate-3 Microphotographs of conjugate calcite veins and conjugate white mineral veins as microfaults. The orientation pattern of heald cracks in mineral grains around the conjugate calcite veins in the microphotograph (a) has been analyzed in results of Fig.5. In the microphotograph (b) are found a calcite vein containing minute fragments of brecciated quartz and feldspars and kink bands of biotite flakes adjacent to calcite veins. In the microphotograph(c), biotite flakes at the point A, which are placed in the intersection zone of conjugate calcite veins, show microfolding which is ascribed to slipping along the veins under the compression pallel to the vertical axis. The microphotograph (d) shows a conjugate system of white mineral veins.



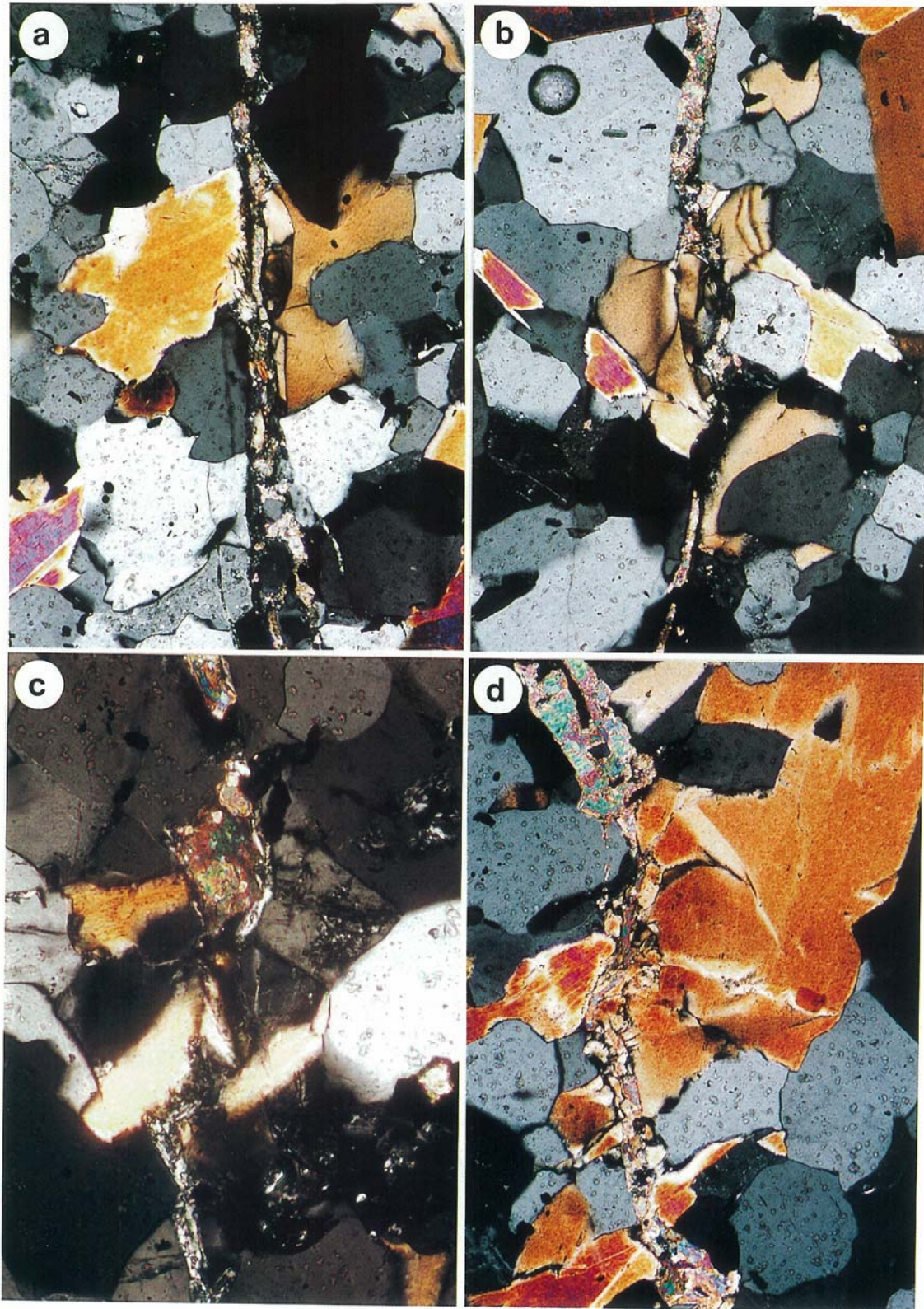
図版-4 方解石脈に沿った滑りを示す黒雲母の微細組織の顕微鏡写真。aとbの写真の黒雲母の微細組織は脈に沿った左横ずれ剪断を示す。cの写真(図版-2cの共役方解石脈交差部の拡大写真)の点Aの黒雲母のキंक帯(dの写真は拡大写真)は脈に沿った左横ずれを示し、点Bの黒雲母の褶曲は垂直方向の圧縮を示す。

Plate-4 Microphotographs showing microtextures of biotite flakes related to slipping along calcite veins. Microtextures of biotite flakes in the microphotographs (a) and (b) show left-lateral shear along calcite veins. Kink bands of biotite flakes of the point A in the microphotograph (c), which is an enlarged microphotograph of the intersection zone of conjugate calcite veins in Plate-2c, show left-lateral shear along calcite vein. The microphotograph (d) is an enlarged microphotograph around the point A. Microfolds of a biotite flake of the point B in the microphotograph (c) are ascribed to the compression parallel to the vertical axis.



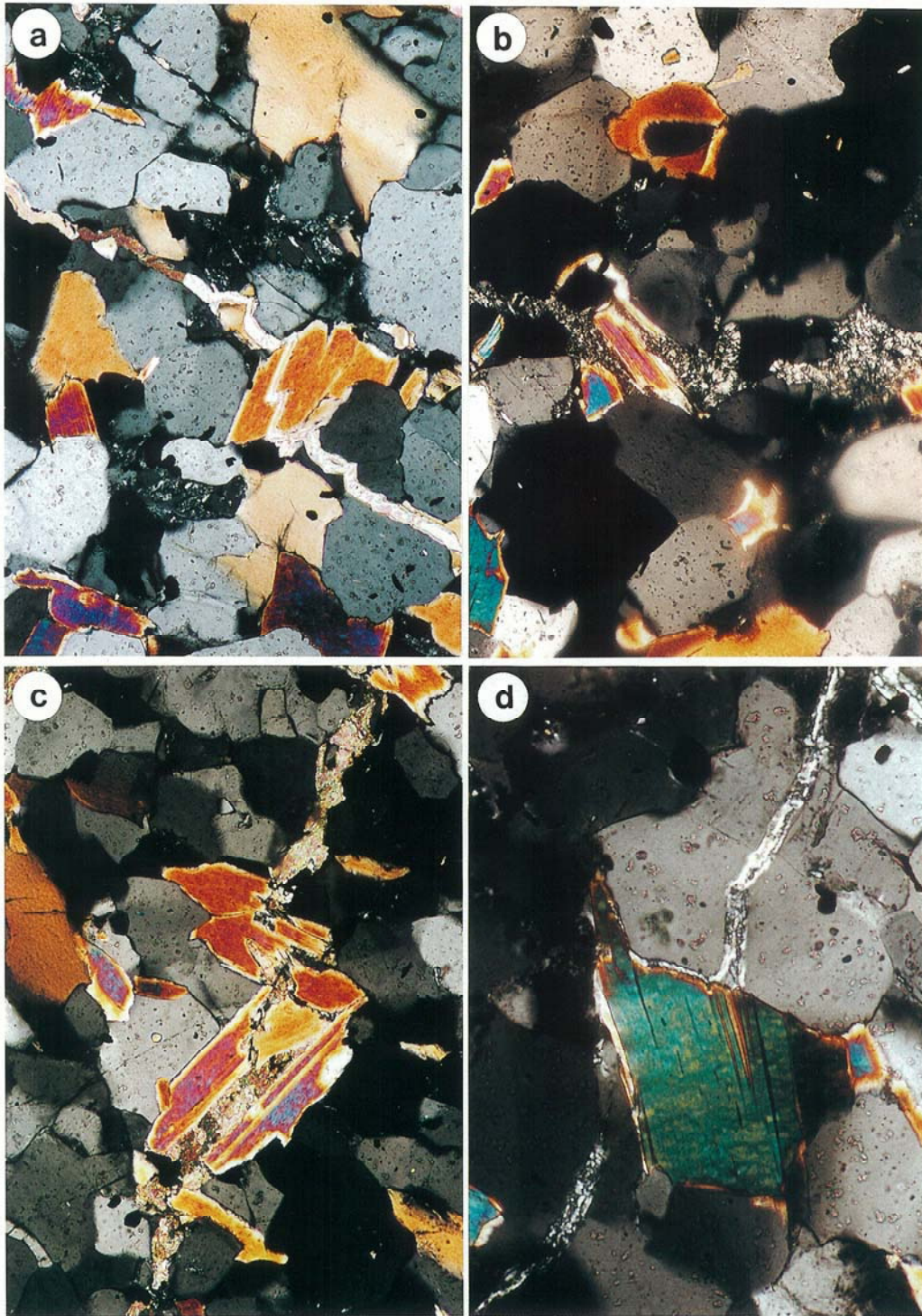
図版-5 方解石脈に沿った滑りを示す黒雲母のキンク帯の顕微鏡写真。aの写真は図版-1の点Aの拡大写真。bの写真はaの写真の点Aの拡大写真：方解石脈に沿った左横ずれ剪断を示すキンク帯。cの写真は図版-1の点Bの拡大写真：方解石脈に沿った左横ずれ剪断を示すキンク帯。dの写真は図版-2 bの点Aの拡大写真：方解石脈に沿った左横ずれ剪断を示すキンク帯。

Plate-5 Microphotographs showing kink bands of biotite flakes related to slipping along calcite veins. The microphotograph (a) is an enlarged microphotograph around the point A in Plate-1. The microphotograph (b) is an enlarged microphotograph around the point A in the microphotograph (a): kink band showing left-lateral shear along calcite vein. The microphotograph (c) is an enlarged microphotograph around the point B in Plate-1: kink band showing left-lateral shear along calcite vein. The microphotograph (d) is an enlarged microphotograph around the point A in Plate-2b: kink band showing left-lateral shear along calcite vein.



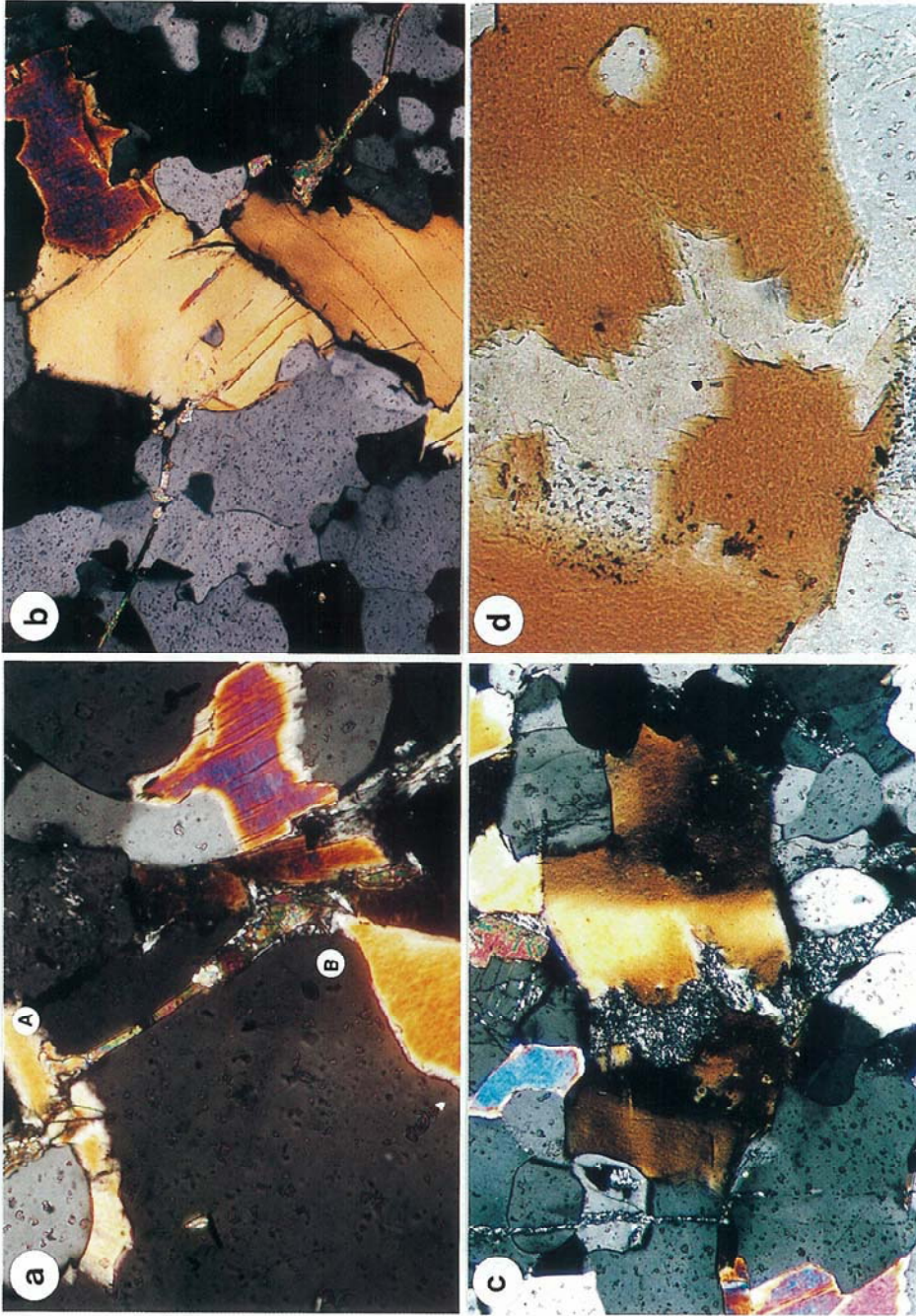
図版-6 方解石脈に沿った滑りを示す黒雲母の微小褶曲の顕微鏡写真。aの写真とcの写真は脈に沿った右横ずれ剪断を示す。cの写真の脈には方解石充填部と白色葉片状鉱物充填部がある。bの写真とdの写真は脈に沿った左横ずれ剪断を示す。dの写真では、方解石脈の右側の粗粒黒雲母のキンク帯に、脈(断層)に沿った圧縮歪みを示す共役性が認められる。

Plate-6 Microphotographs showing microfolds of biotite flakes related to slipping along calcite veins. The styles of microfolds of the microphotographs (a) and (c) show right-lateral shear along calcite-veins, while those of the microphotographs (b) and (d) show left-lateral shear along calcite veins. The calcite vein of the microphotograph (c) is partly filled with white flaky minerals. In a coarse-grained biotite flake placed in right side of the calcite vein of the microphotograph (d) are found kink bands of conjugate sets, showing compressive strain along the vein as a microfault.



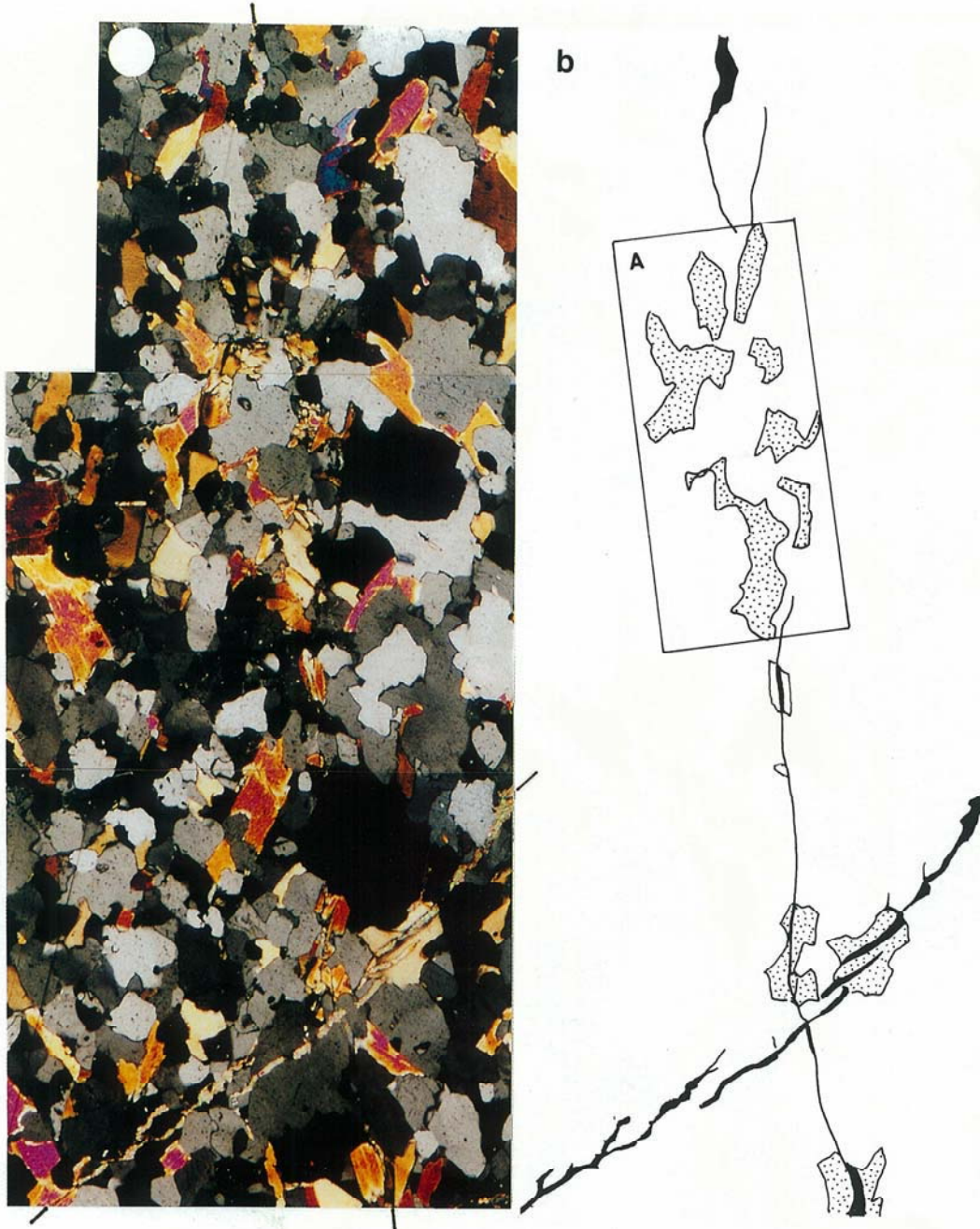
図版-7 方解石脈と白色鉱物脈に沿っての滑りを指示しない黒雲母の微細組織の顕微鏡写真。aの写真の方解石脈は、黒雲母の(001)面の開口と(001)面に直交するクラックの開口により形成されている。bの写真の白色鉱物脈は黒雲母の粒界と(001)面の開口により形成されており、脈内において白色葉片状鉱物はランダムに配列している。cの写真の方解石脈は黒雲母の粒界と(001)面の開口により形成されている。dの写真の白色鉱物脈は黒雲母の粒界の開口により形成されており、石英中で白色葉片状鉱物は脈のトレンドにほぼ直交するように成長している。

Plate-7 Microphotographs showing microtextures of biotite flakes not indicating slipping along calcite veins and white mineral veins. Calcite vein in the microphotograph (a) is produced by opening of (001) plane and of cracks normal to (001) plane of biotite flake. White mineral vein in the microphotograph (b) is produced by opening of (001) plane and grain boundary of biotite flakes, and in the vein are randomly oriented white flaky minerals. Calcite vein in the microphotograph (c) is produced by opening of (001) plane and grain boundaries of biotite flakes. White mineral vein in the microphotograph (d) is produced by opening of grain boundary of biotite flake, and white flaky minerals in the vein in quartz grains grow in a direction approximately normal to its trend.



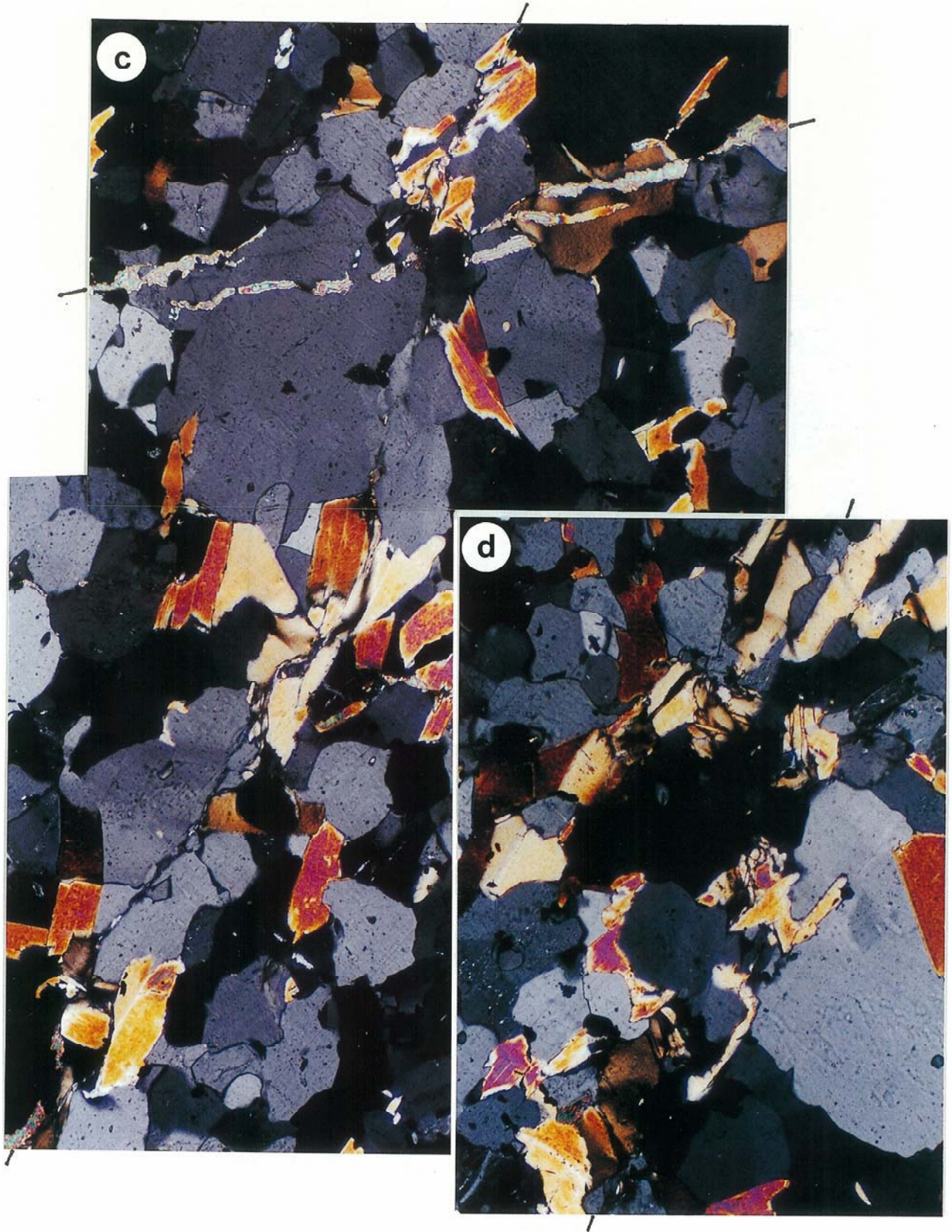
図版-8 方解石脈と白色鉱物脈に沿った黒雲母の微細組織の顕微鏡写真。aの写真で点Aの黒雲母は方解石脈が通過する時キンク帯の形成により変形するが、点Bでは方解石脈は黒雲母の粒界と(001)面の開口により形成されている。bの写真では方解石脈は黒雲母の粒界と(001)面の開口により形成されている。cの写真(dの写真はオープン・ニコルでの拡大写真)の白色鉱物脈は、キンクを示す黒雲母が帯内において(001)面およびそれに垂直なクラックの開口により変形したことを示す。

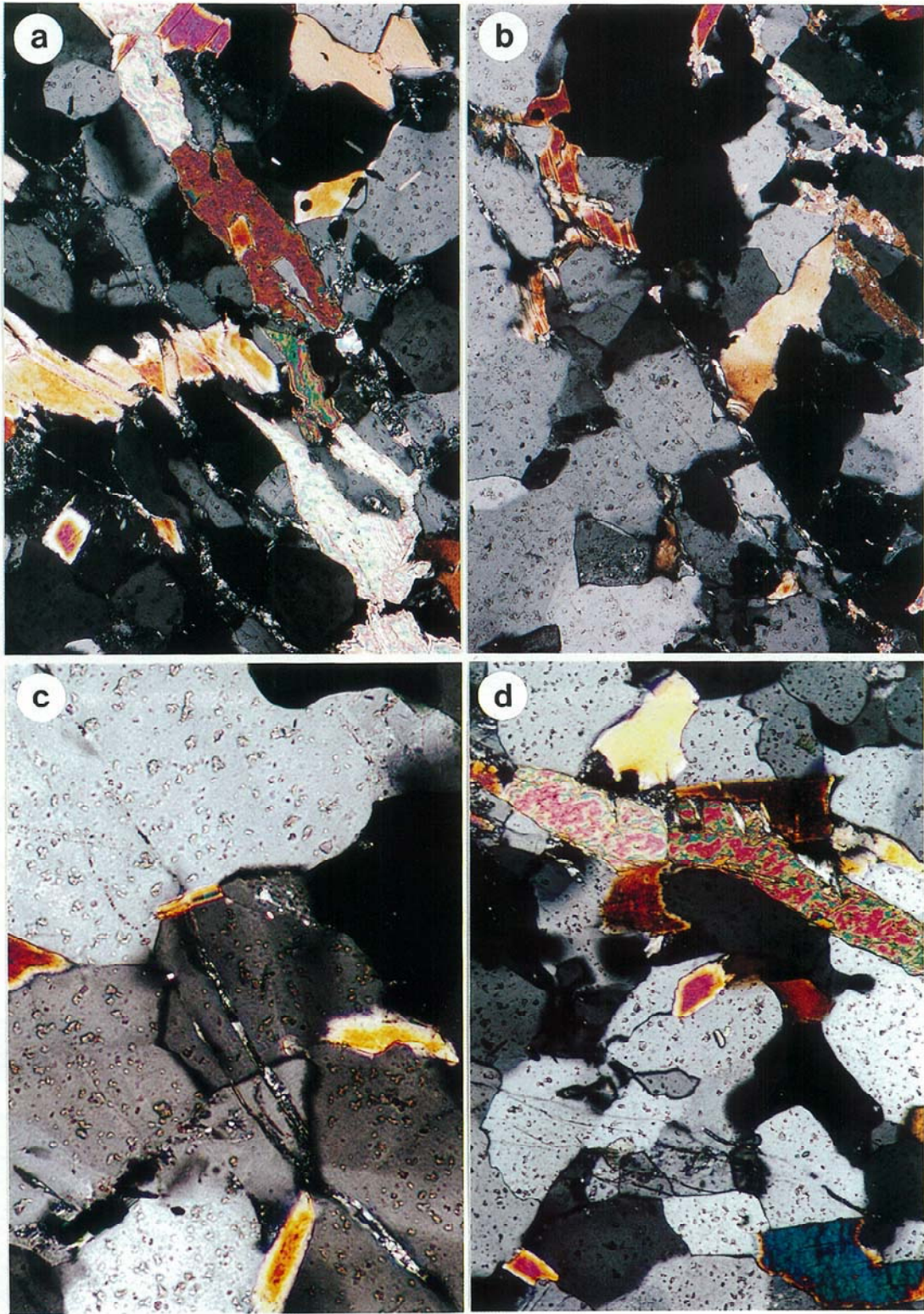
Plate-8 Microphotographs showing microstructures of biotite flakes along calcite veins and while mineral vein. In the microphotograph (a), biotite flake cut across by calcite vein at the point A is deformed by the formation of kink bands, while at the point B the calcite vein is produced by opening of (001) plane and grain boundaries of biotite flakes. Calcite vein in the microphotograph (b) is produced by opening of (001) plane and grain boundaries of biotite flakes. White mineral vein in the microphotograph (c), whose enlarged microphotograph is shown in the microphotograph (d) under open nichol, is found within a large kink band of biotite flake, showing that the vein was produced by opening of its (001) planes and their normal cracks.



図版-9 aの写真とbのスケッチに見られる1つの共役系微小断層の微細組織を説明する図。cの写真はaの写真の下端部の拡大写真。dの写真はbのスケッチ中の領域Aの拡大写真。bのスケッチで、点々の領域は断層に沿った黒雲母のうちキンク帯を示すもの、黒色の線は断層としてのヒールド・クラック、黒色の領域は方解石脈。断層に沿う黒雲母にはキンク帯発達顕著。領域Aのキンク帯の配列パターンは、断層のトレンドに沿った右横ずれ剪断を示唆。低角度配置の断層に沿う1つの黒雲母中の方解石脈は左横ずれ剪断を示すキンク帯の帯境界の開口によって形成されている。

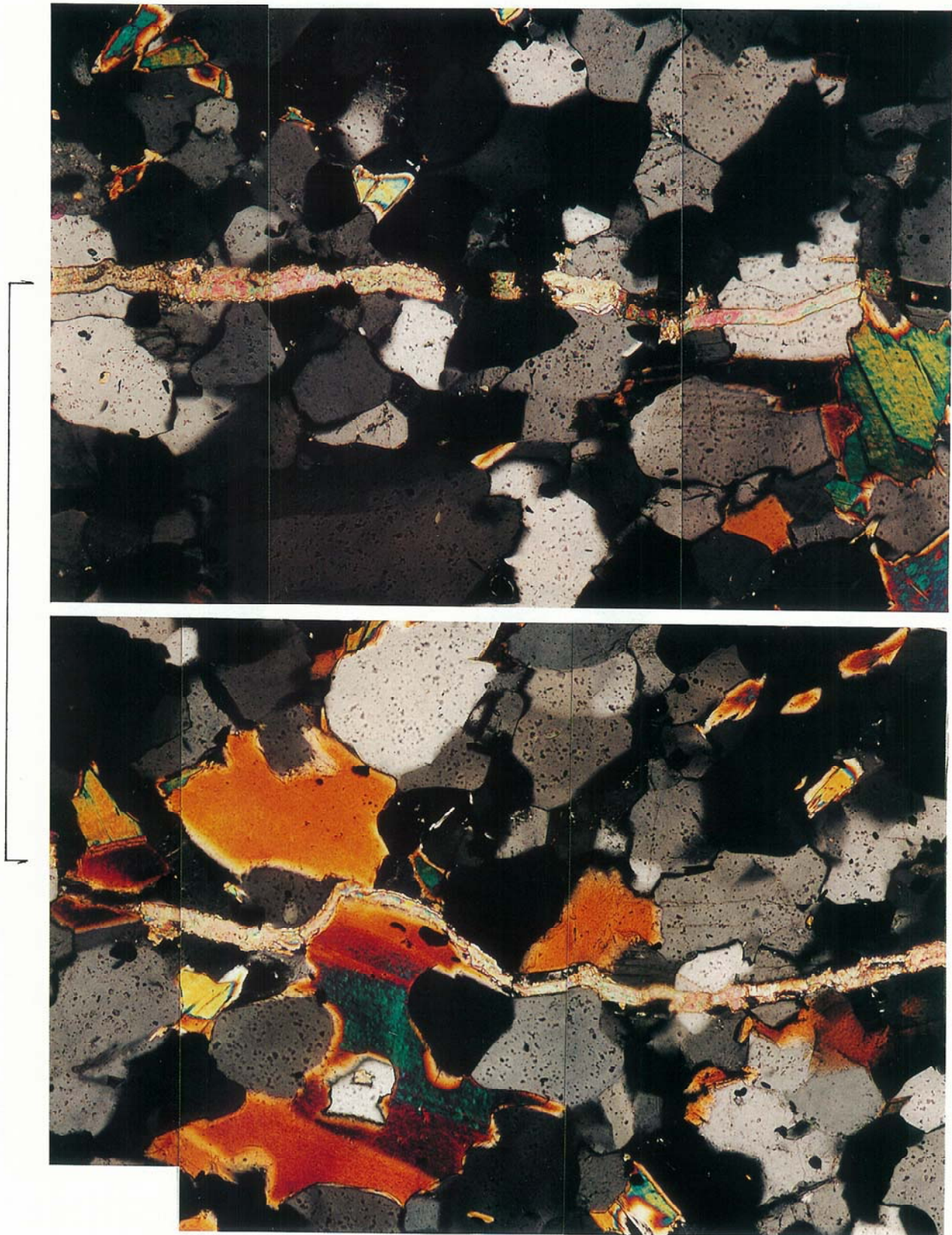
Plate-9 Diagrams illustrating microtextures of a conjugate system of microfaults, which is found in the microphotograph (a) and the sketch (b). An enlarged microphotograph of the bottom part of the microphotograph (a) is shown in the diagram (c) and an enlarged microphotograph of the domain A in the sketch (b) is shown in the diagram (d). In the sketch (b), stippled areas are biotite flakes with kink bands along the microfaults, solid lines are healed cracks as microfaults and solid areas are calcite veins. In biotite flakes along the microfaults are strongly developed kink bands. The orientation pattern of kink bands in the domain A suggests a right-lateral shear on the microfault along the vertical axis of the sketch (b). Calcite veins in a biotite flake along the microfault of the low-angle set are produced by opening of the band boundaries of kink bands, which show left-lateral shear.





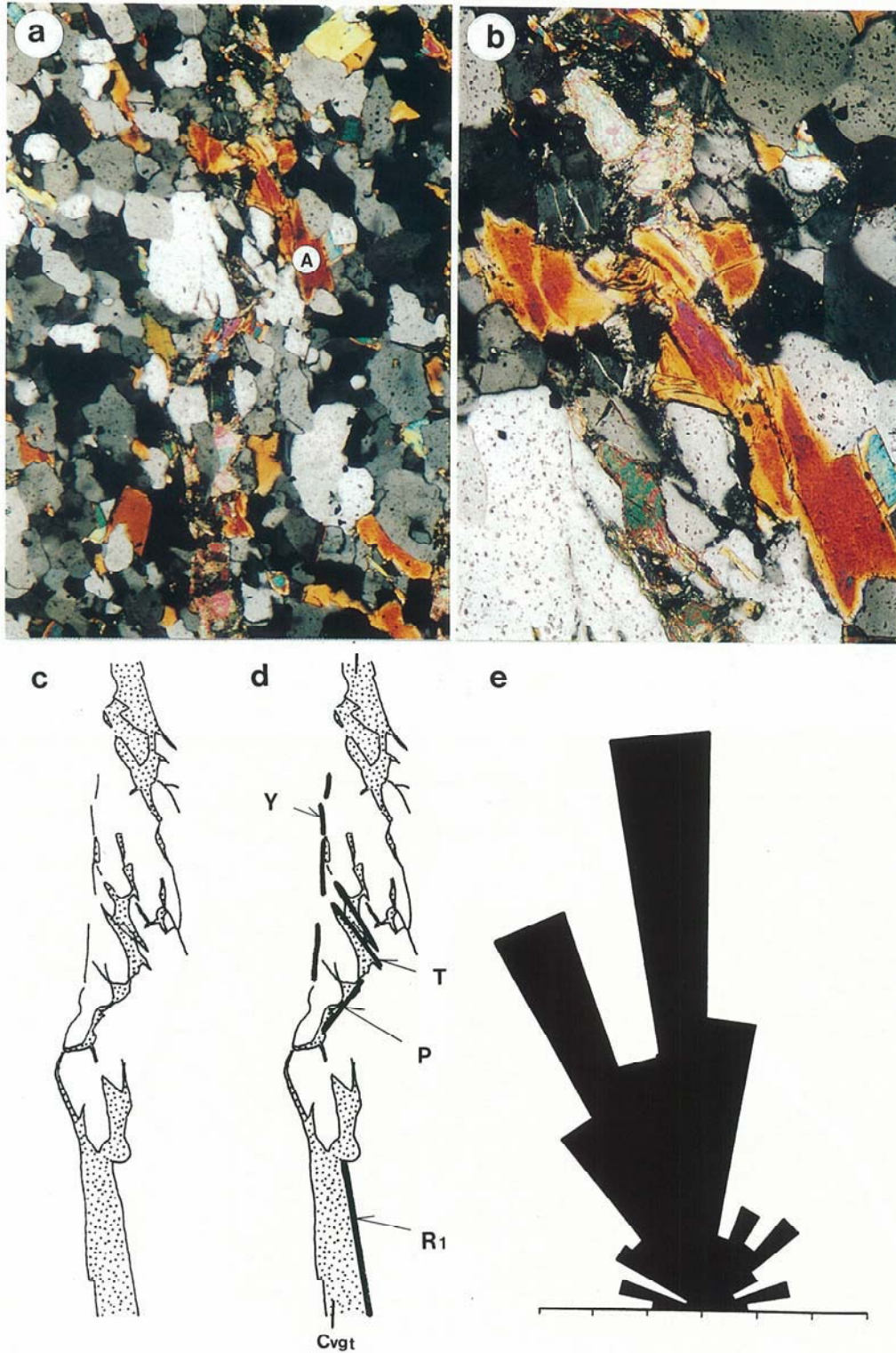
図版-10 断層としての方解石脈近傍のクラックの微細組織の顕微鏡写真。a, b, cの写真は、方解石脈に平行～亜平行に配列する白色葉片状鉱物充填クラックによって切断される黒雲母が、キンク帯を形成して変形することを示している。dの写真は、方解石脈に平行～亜平行に配列する黒色微細ダストをもつヒールド・クラックと方解石脈を切る雁行状白色鉱物脈を示す。この雁行状白色鉱物脈の形成は方解石脈に沿った右横ずれ剪断を示唆。

Plate-10 Microphotographs showing microtextures of cracks developed in the vicinity of calcite veins as micro-faults. The microphotographs (a), (b) and (c) indicate that biotite flakes cut across by white flaky mineral-filled cracks parallel or subparallel to the calcite veins are deformed by the formation of kink bands. In the microphotograph (d) are found minute black dust-filled cracks parallel or subparallel to a calcite vein and en echelon cracks cutting across the vein, which are filled with white flaky mineral and are ascribed to the right-lateral shear along it.



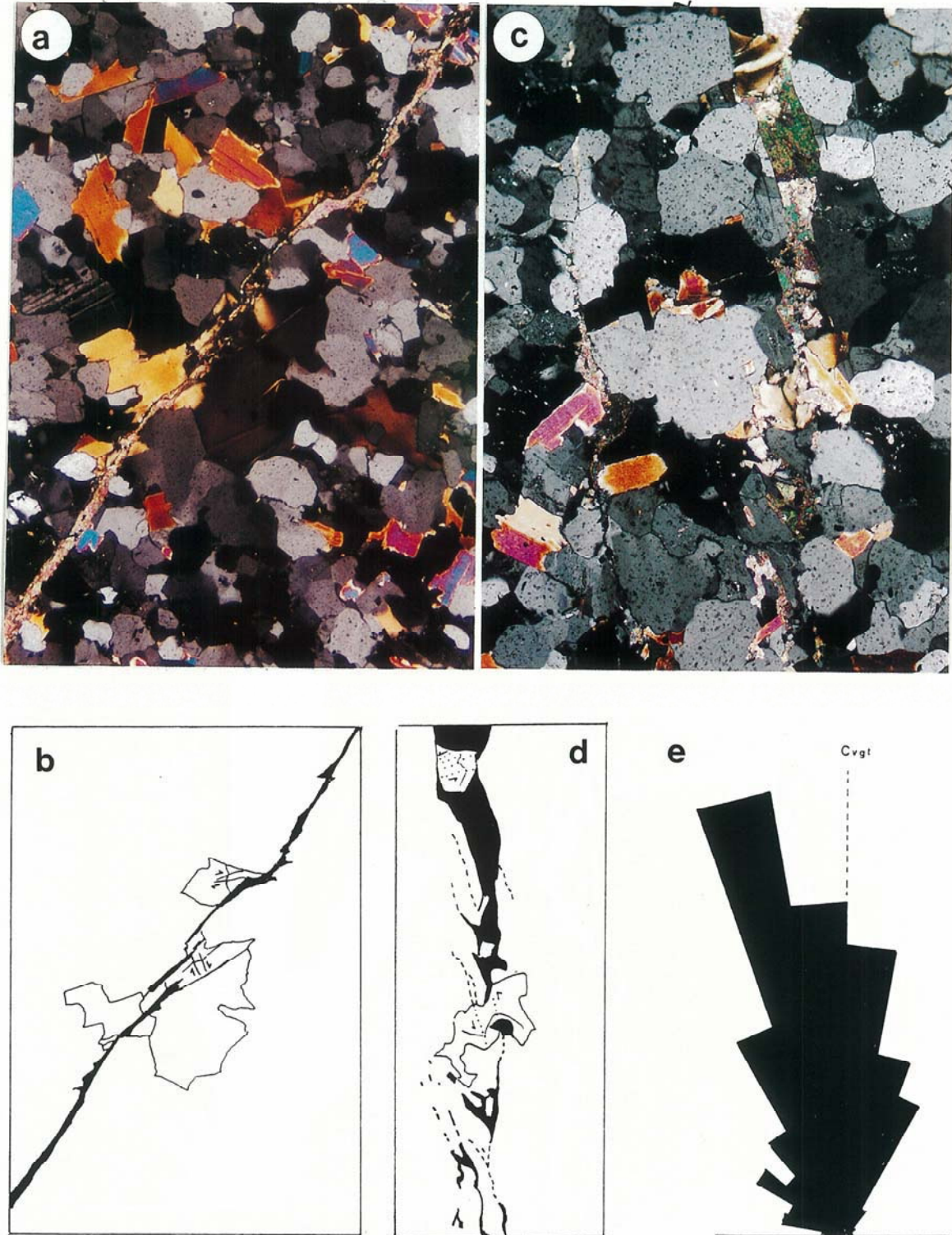
図版-11 図-6の資料がとられた領域（方解石脈とその周辺）の顕微鏡写真。ヒールド・クラックは微弱。

Plate-11 Microphotograph of the domain (calcite vein and its surroundings) from which are obtained the data for Fig.6. Healed cracks are poor within the domain.



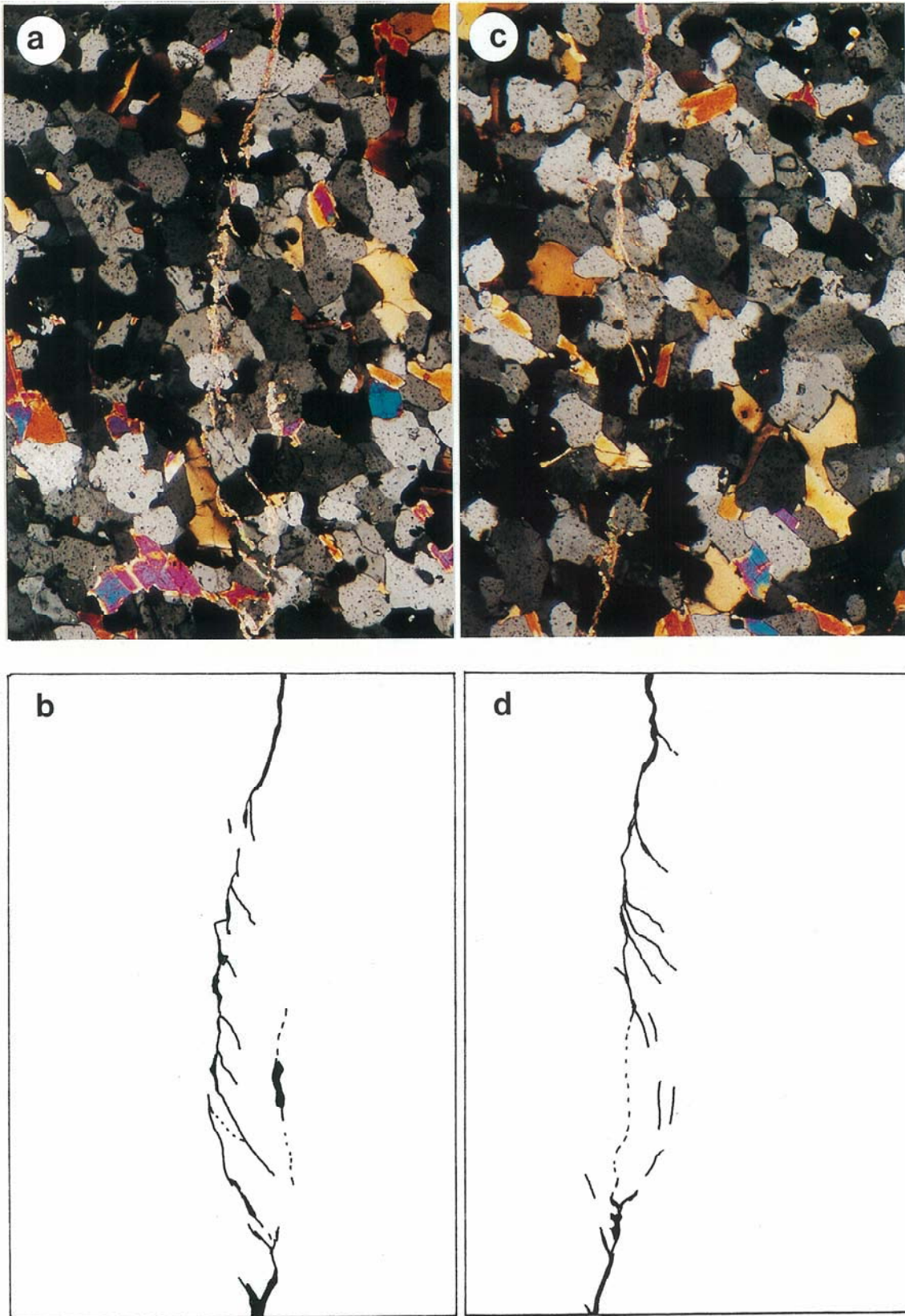
図版-12 薄い貧弱な方解石脈のみが発達する領域の変形微細組織を示す図。aの図がこの領域の顕微鏡写真。cの図がこの領域で見いだされる方解石脈のスケッチ。bの図がaの図中の点Aの黒雲母のキンク帯の拡大顕微鏡写真。dの図が、黒雲母のキンク帯から決定される剪断センスを考慮しての、方解石脈の壁を構成するクラックの区分(R1, P, Y, T)。eのローズ図は方解石脈の壁を構成するクラックの配列方位を示す。Cvgtは方解石脈群を含む領域の一般的方位。

Plate-12 Diagrams illustrating deformation microtextures of a domain in which tiny calcite veins are only found. Microphotograph of this domain is given in the diagram (a). The diagram (c) is a sketch of calcite veins found in the domain. The diagram (b) is an enlarged microphotograph of kink bands of biotite flakes at the point A. In the diagram (d) is shown the classification of cracks (R1, P, Y and T) forming the walls of calcite veins with reference to shear sense decided from kink bands of biotite flakes. The rose diagram (e) illustrates their orientation direction. The Cvgt is the general trend of the domain containing tiny calcite veins.



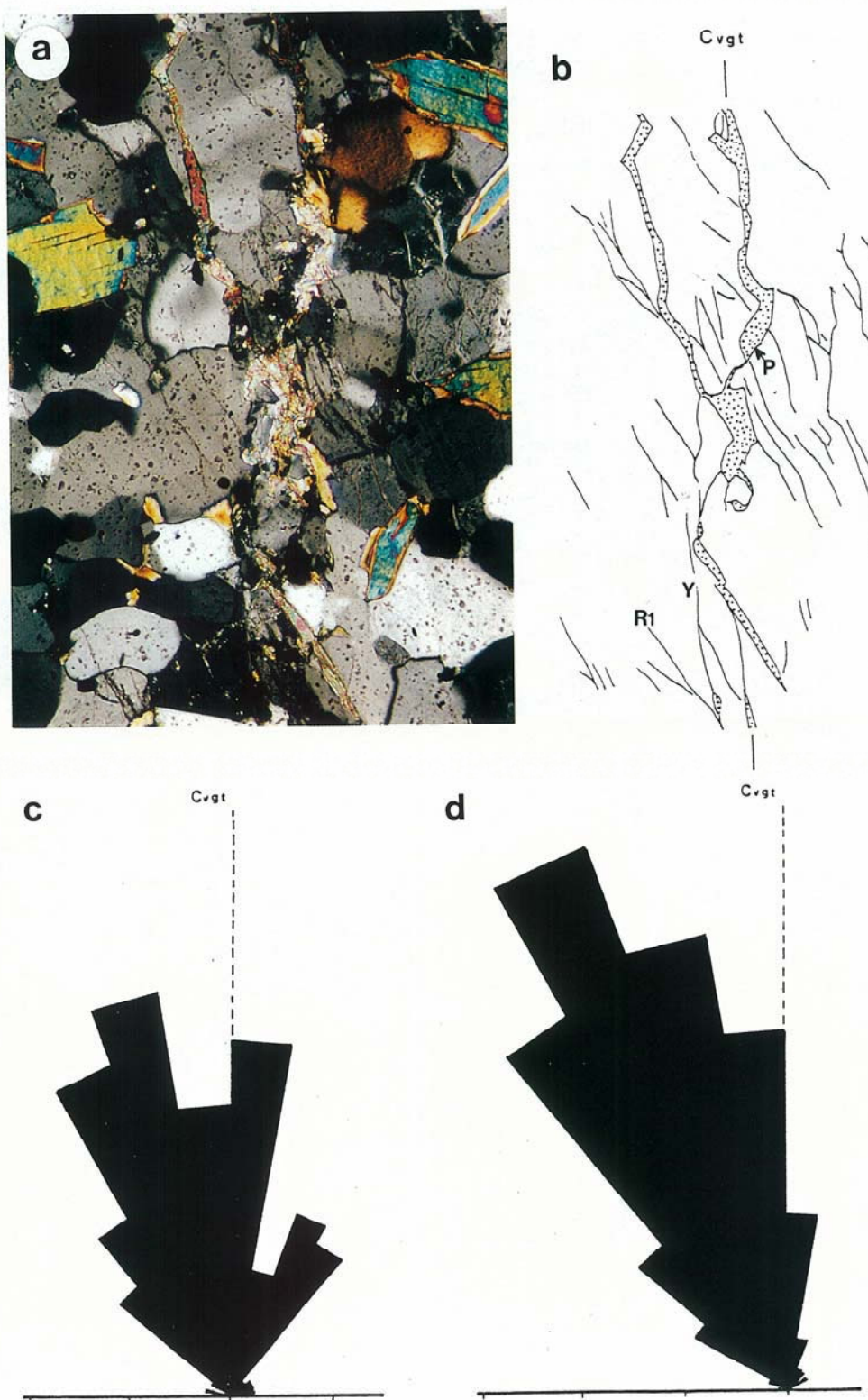
図版-13 薄い貧弱な方解石脈のみが発達する2つの領域（aの写真の領域とcの写真の領域）の変形微細組織を示す図。bのスケッチはaの写真中の方解石脈とそれにそって黒雲母片に見られる微細組織を示す。dのスケッチはcの写真中の右側の方解石脈とそれにそって黒雲母片に見られる微細組織を示す。eのローズ図はdのスケッチの方解石脈の壁を構成するクラックの配列方位を示す。Cvgtは方解石脈群を含む領域の一般的方位。

Plate-13 Diagrams illustrating deformation microtextures of two domains {domain of the microphotograph (a) and domain of the microphotograph (c)} in which tiny calcite veins are only found. The sketch (b) illustrates microtextures of calcite veins and their surrounding biotite flakes in the microphotograph (a). The sketch (d), which is for calcite veins of the right side in the microphotograph (c), illustrates microtextures of the veins and their surrounding biotite flakes. The rose diagram (e) illustrates the orientation direction of cracks forming the walls of the veins. The Cvgt is the general trend of the domain containing tiny calcite veins.



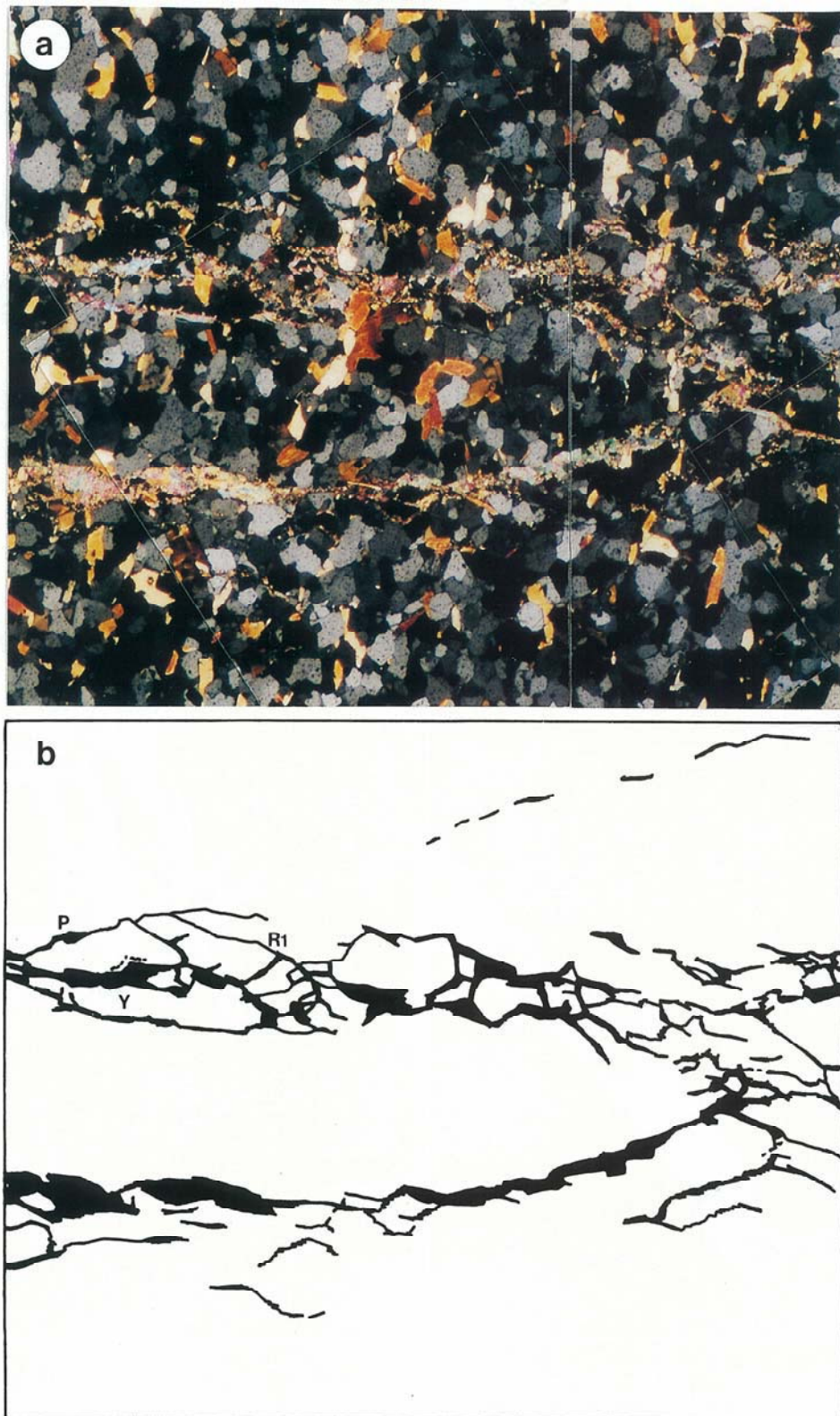
図版-14 薄い貧弱な方解石脈のみが発達する2つの領域 (aの写真の領域とcの写真の領域) の変形微細組織を示す図。bのスケッチとdのスケッチはaの写真とcの写真中の方解石脈の微細組織を示す。

Plate-14 Diagrams illustrating deformation microtextures of two domains (domain of the microphotograph (a) and domain of the microphotograph(c)) in which tiny calcite veins are only found. The sketch (b) and sketch (d) illustrate microtextures of calcite veins in the microphotograph (a) and microphotograph (c) respectively.



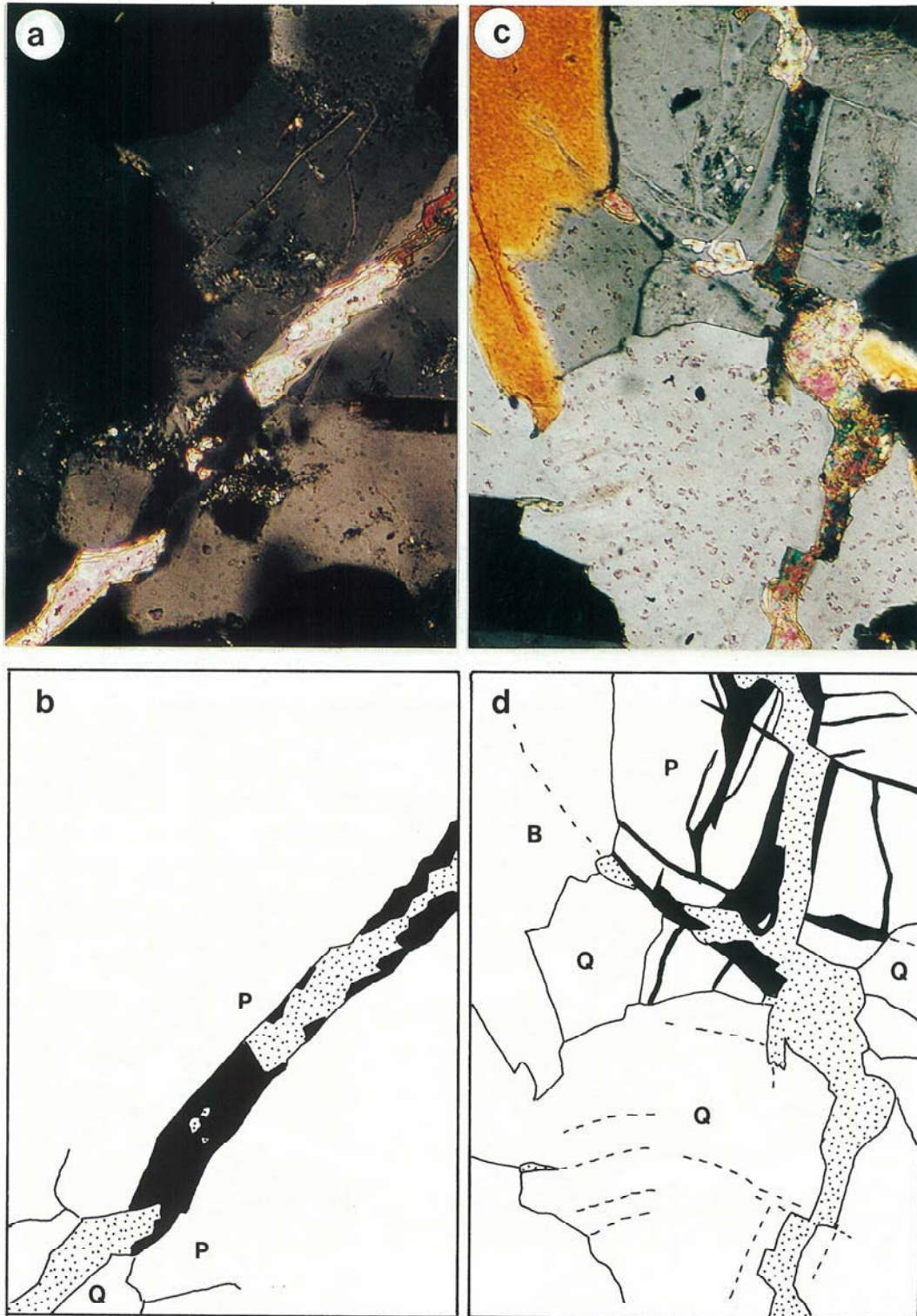
図版-15 薄い貧弱な方解石脈のみが発達する領域 (aの写真の領域) の変形微細組織を示す図。bのスケッチはaの写真の方解石脈 (点々の領域) とヒールド・クラック (黒い線) の微細組織 (R1クラック, Pクラック, Yクラック) を示す。cのローズ図は方解石脈の壁を構成するクラックの配列方位を示す。dのローズ図はヒールド・クラックの配列方位を示す。

Plate-15 Diagrams illustrating deformation microtextures of a domain {domain of the microphotograph (a)} in which tiny calcite veins are only found. The sketch (b) illustrates microtextures of calcite veins (stippled areas) and healed cracks (solid lines) in the microphotograph (a), classifying R1 cracks, P cracks and Y cracks. The rose diagram (c) illustrates the orientation pattern of cracks forming the walls of calcite veins, while the rose diagram (d) does the orientation pattern of healed cracks. The Cvgt is the general trend of the domain containing tiny calcite veins.



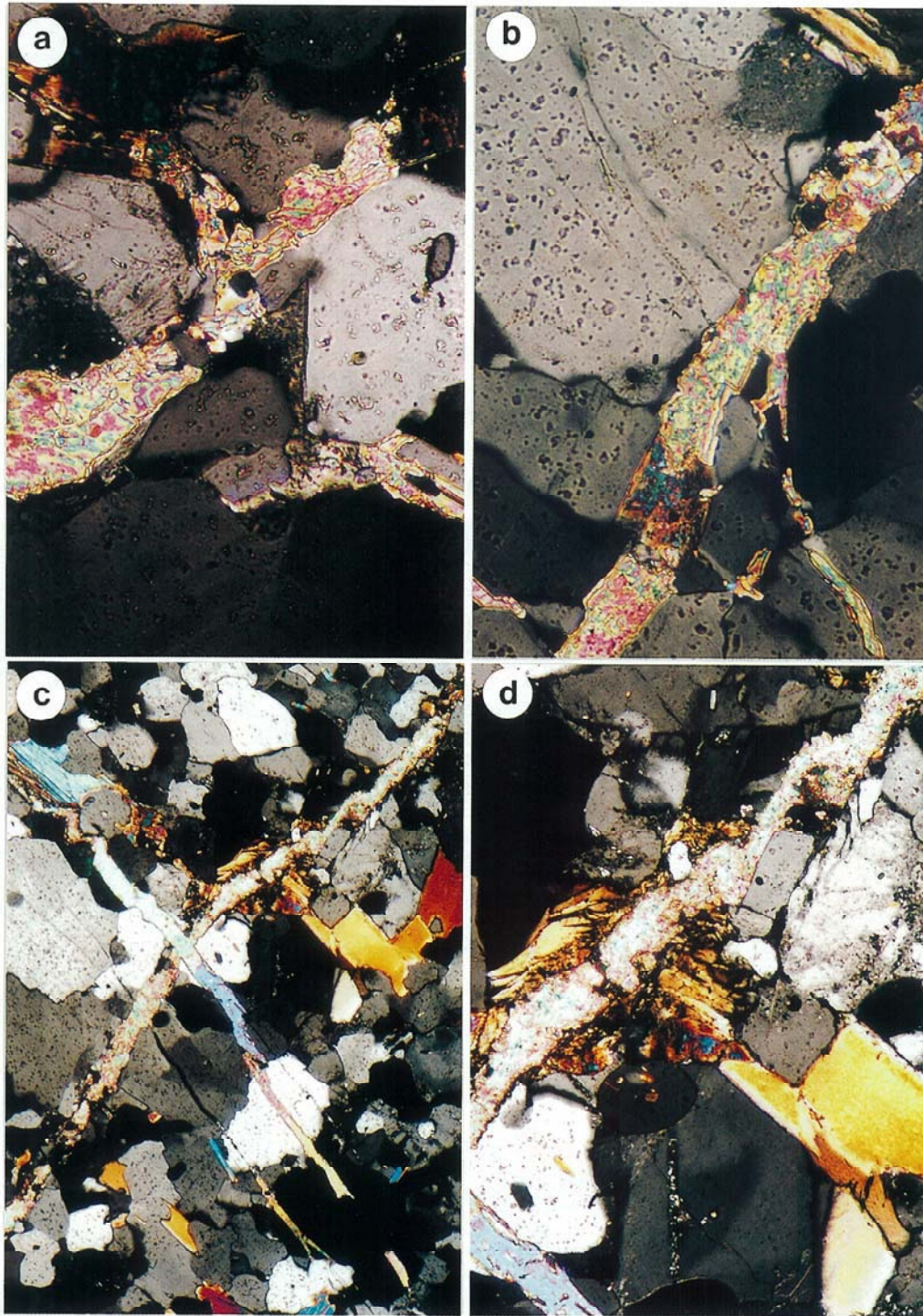
図版-16 薄い貧弱な方解石脈のみが発達する領域 (aの写真の領域) の変形微細組織を示す図。黒雲母のキンク帯から読み取られた方解石脈の全体的な方向 (=水平軸=Cvgt) に沿った剪断センスは右横ずれ。bのスケッチはaの写真の方解石脈の微細組織を示す。これらの方解石脈は、R1、P、Yクラックと見なされる可能性がある。

Plate-16 Diagrams illustrating deformation microtextures of a domain {domain of the microphotograph (a)} in which tiny calcite veins are only found. The shear sense along the general trend of the domain containing calcite veins (= horizontal axis= Cvgt) is right-lateral. The sketch (b) illustrates microtextures of the calcite veins, which are possibly referred to the R1, P and Y cracks.



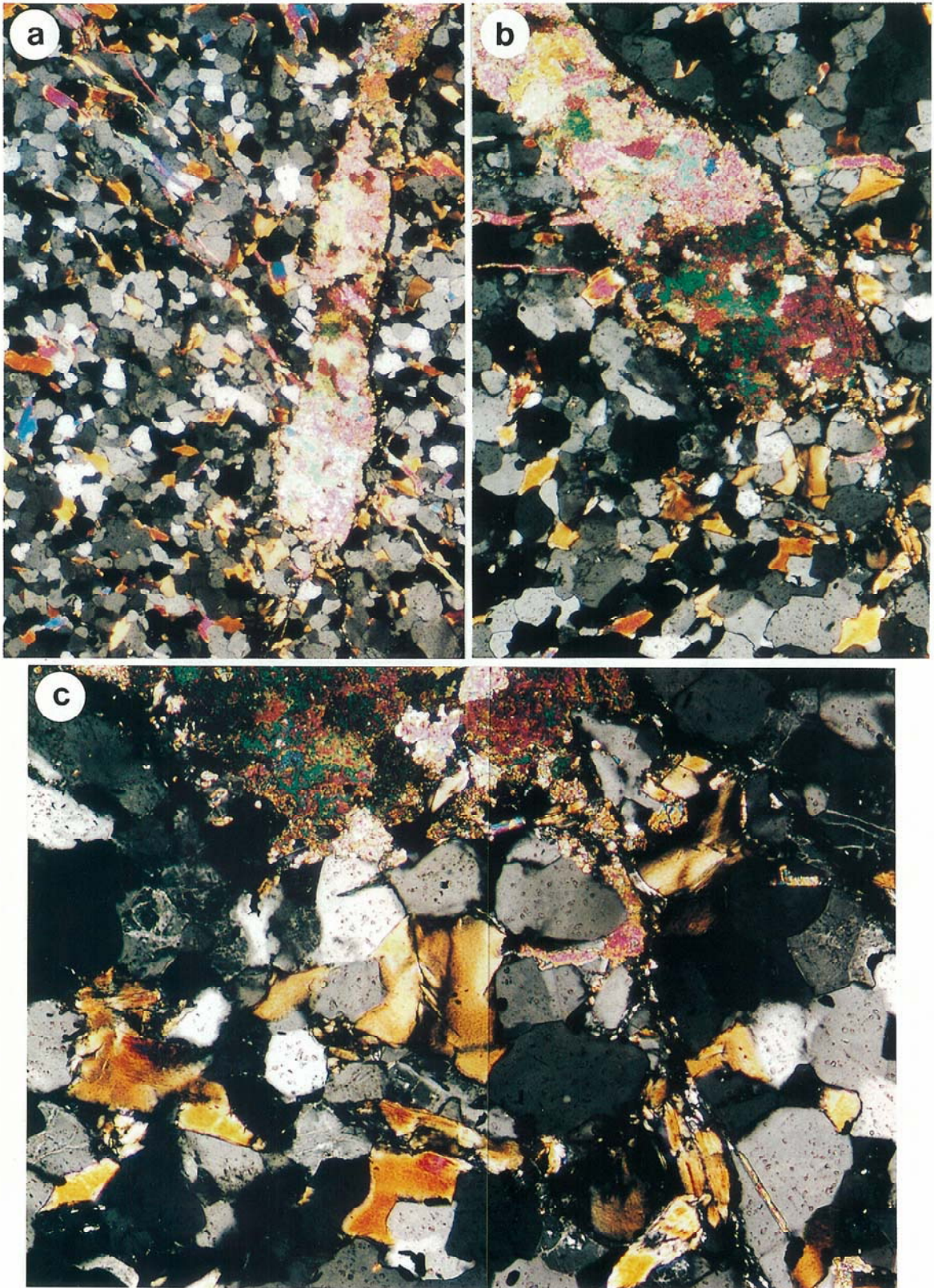
図版-17 複合脈の微細組織。aの写真(=bのスケッチ)の脈は、方解石充填脈(点々の領域)と斜長石充填脈(黒色の領域)からなる複合脈。cの写真(=dのスケッチ)には、方解石充填脈と斜長石充填脈の共役セットが認められる。前者がより後期に形成されている。方解石充填脈には多くのオフセット構造がある。その位置は斜長石中では微細な斜長石充填クラック、石英中では黒色微細ダスト充填ヒールド・クラックに支配されている。

Plate-17 Microtextures of composite veins. The vein in the microphotograph (a), whose sketch is the diagram (b), is a composite vein consisting of calcite-filled vein (stippled areas) and plagioclase-filled vein (solid areas). In the microphotograph (c), whose sketch is the diagram (d), are found conjugate sets of calcite-filled veins and plagioclase-filled veins, showing that the former postdates the latter. There are many off-sets of calcite-filled veins, whose sites are mainly controlled by tiny plagioclase-filled cracks in plagioclase grains and by minute black dust-filled cracks in quartz grains.



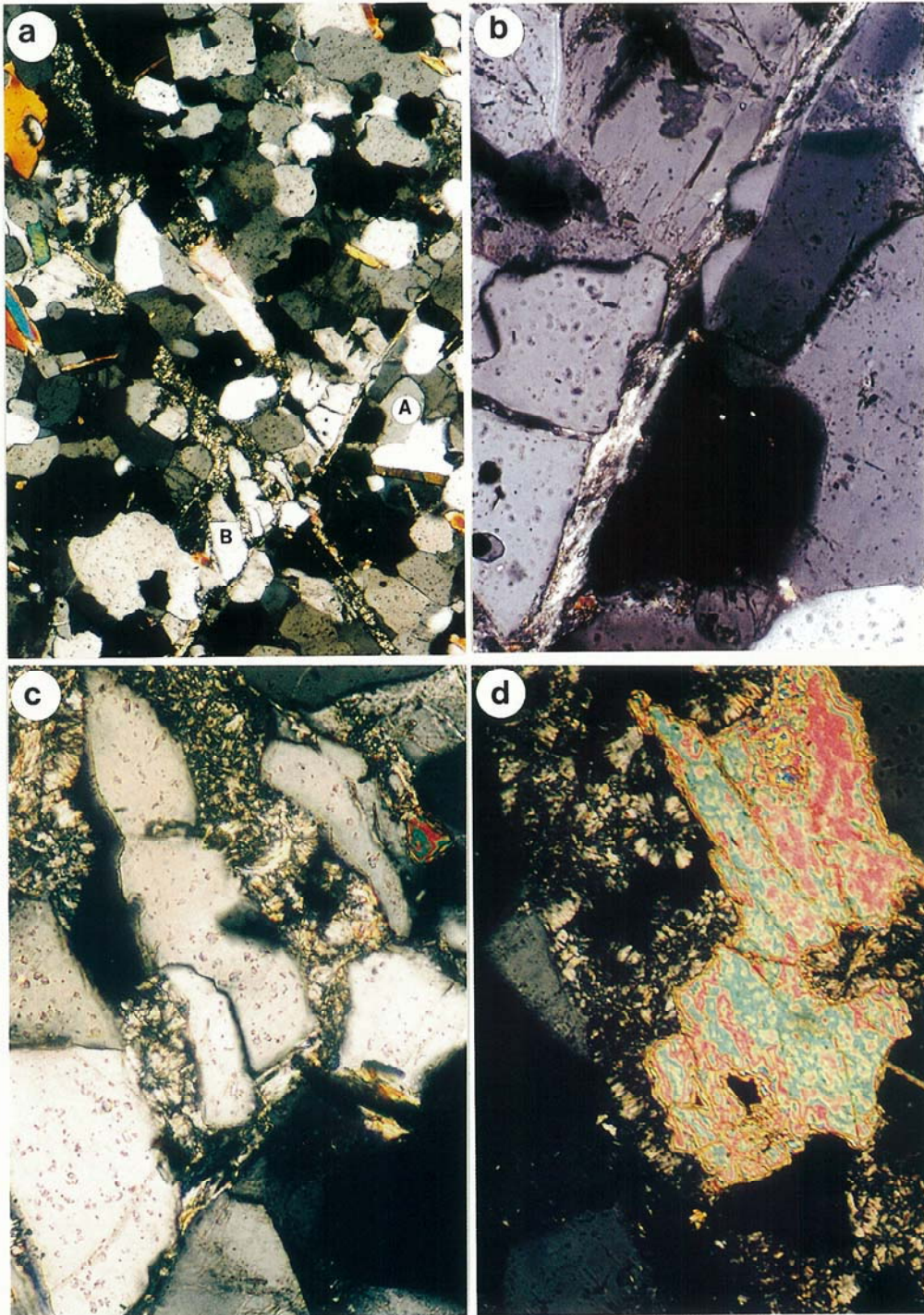
図版—18 共役方解石脈の交差部の微細組織の顕微鏡写真。aの写真は図版—2 aの拡大写真である。ヒールド・クラックは、方解石脈のトレンドに平行な共役セットを形成する。bの写真は図版—3 cの拡大写真である。方解石脈のトレンドに平行なヒールド・クラックが明瞭である。cの写真は図版—1の点Cの拡大写真。共役方解石脈に沿ったクラックが明瞭である。左横ずれセンスのセットでは、ヒールド・クラックはR1相当の雁行性を示し方解石脈はそれを反映して階段状である(dの写真)。

Plate-18 Microphotographs showing microtextures of the intersection zones of conjugate calcite veins. In the microphotograph (a), which is an enlarged one of Plate-2a, are found conjugate cracks which are harmonically oriented with their surrounding conjugate calcite veins. In the microphotograph (b), which is an enlarged one of Plate-3c, are found planar healed cracks developed in a trend parallel to a calcite vein. In the microphotograph (c), which is an enlarged one around the point C of Plate-1, are found conjugate cracks which are harmonically oriented with their surrounding conjugate calcite veins. The stepwise shape of the left-lateral shear set of calcite vein is related to the en echelon arrangement of healed cracks, which are probably referred to the R1 crack (see Plate-18d).



図版-19 厚い方解石脈（aの写真と図-10のスケッチ）末端の微細組織の顕微鏡写真。bの写真とcの写真において、厚い方解石脈の延長線上の断層は、白色葉片状鉱物の充填する微弱なクラックとして観察される。厚い方解石脈末端周辺の黒雲母にはキック褶曲が強く発達する。黒雲母のキック褶曲は、この断層が左横ずれ滑りと、断層に沿った圧縮歪みを示唆する。

Plate-19 Microphotographs showing microtextures around the end of a thick calcite vein, which is shown in the microphotograph (a) and a sketch of Fig.10. Microfaults on the extension of the thick calcite vein are clearly observed as tiny cracks filled with minute white flaky minerals in the microphotographs (b) and (c). In biotite flakes around the end of the thick vein are strongly developed kink folds, showing left-lateral slip and compressive strain along the microfaults.



図版-20 共役白色鉱物脈（aの写真と図-11のスケッチ）の交差部の微細組織の顕微鏡写真。bの写真はaの写真の点Aの拡大写真。この写真の白色鉱物脈において、白色葉片状鉱物の形態定向配列は、脈に沿った左横ずれ剪断を示唆する。cの写真はaの写真の点Bの拡大写真。この写真の白色鉱物脈には、脈の分岐とそれを充填する白色葉片状鉱物の球顆状組織が認められる。aの写真（図-11のスケッチ）は脈の分岐が交差部からはなれた位置で消えることを示す。dの写真は、分岐部から離れた位置でも、白色葉片状鉱物の球顆状組織が明瞭であることを示す。

Plate-20 Microphotographs showing microtextures around the intersection zone of conjugate white mineral veins, which are shown in the microphotograph (a) and a sketch of Fig.11. The microphotograph (b) is an enlarged one around the point A in the microphotograph (a), showing preferred dimensional orientation of white flaky minerals which crystallized under left-lateral shear along the vein. In the microphotograph (c), which is an enlarged one around the point B in the microphotograph (a), is observed splaying of the vein where white flaky mineral shows spherulitic textures. The microphotograph (a) indicates that the splaying of the vein disappears in positions away from the intersection zone, where also spherulitic textures of white flaky minerals are clearly found, as shown in the microphotograph (d).

